البترول والغاز الطبيعى

من الجيولوجيا إلى الاستكشاف والإنتاج

أستاذ دكتور سليم زيدان
أستاذ العلوم الجيولوجية والجيوفيزياء التطبيقية
قسم التعدين والبترول - كلية الهندسة - جامعة الأزهر
ورئيس قسم هندسة البترول وتكنولوجيا الغاز
كلية الهندسة - الجامعة البريطانية فى مصر سابقا



البترول والغاز الطبيعى
من الجيولوجيا إلى الاستكشاف والإنتاج

الدكتور سليم زيدان
أستاذ العلوم الجيولوجية والجيوفيزياء التطبيقية
قسم التعدين والبترول - كلية الهندسة - جامعة الأزهر
ورئيس قسم هندسة البترول وتكنولوجيا الغاز
كلية الهندسة - الجامعة البريطانية فى مصر سابقاً

الطبعة الأولى
١٤٣٤هـ - ٢٠١٣م

ملتزم الطبع والنشر
دار الفكر العربى
٩٤ شارع عباس العقاد - مدينة نصر - القاهرة
ت: ٢٢٧٥٢٧٩٤ - فاكس: ٢٢٧٥٢٧٣٥
٦ أ شارع جواد حسني - ت: ٢٣٩٣٠١٦٧
www.darelfikrelarabi.com
info@darelfikrelarabi.com

٦٢٢،١٨ سليم زيدان.
س ل ب ت البترول والغاز الطبيعي من الجيولوجيا إلى الاستكشاف والإنتاج/
سليم زيدان.- القاهرة: دار الفكر العربي، ١٤٣٤ هـ = ٢٠١٣م.
٥٨٢ ص: إيض ؛ ٢٤ سم.
ببليوجرافية: ص٥٥٧ - ٥٦٤.
يشتمل على فهرس للمصطلحات إنجليزي - عربي.
تدمك: ٨ - ٢٨٧٥- ١٠ - ٩٧٧ - ٩٧٨.
١- جيولوجية البترول والغاز الطبيعي. ٢- الاستكشاف
وأساليب الحفر. ٣- الإنتاج وهندسة البترول. أ- العنوان.

جمع إلكتروني وطباعة



بسم الله الرحمن الرحيم

﴿ ...فَأَمَّا ٱلزَّبَدُ فَيَذْهَبُ جُفَآءً وَأَمَّا مَا يَنفَعُ ٱلنَّاسَ فَيَمْكُثُ فِي ٱلْأَرْضِ ... ﴾

[الرعد]

صدق الله العظيم

إهــداء

إلى زوجتي ...

إلى أبنائي نانسي ورندا وأشرف

الذين كانوا خير عون لي في إنجاز هذا الكتاب

المحتويات

الموضوع	الصفحة

الموضوع	الصفحة

الموضوع	الصفحة

الموضوع	الصفحة

الموضوع	الصفحة

الجزء الثاني: الاستكشاف والحفر

الموضوع	الصفحة

الموضوع	الصفحة

الجزء الثالث: الإنتاج وهندسة البترول

الموضوع	الصفحة

الموضوع	الصفحة

الموضوع	الصفحة

الموضوع	الصفحة

الموضوع	الصفحة

الموضوع	الصفحة

مقدمة

هذا الكتاب هو محاولة جادة لتحقيق غاية سامية تستهدف استعادة مجد اللغة العربية القديم في التأليف العلمي، وأن نذهب بتلك الإدّعاءات التي طالما ترددت بأن اللغة العربية لا تصلح لمواكبة التطورات العلمية والتقنية، وأن نثبت أيضاً أن هذه اللغة قادرة على التعبير بسهولة ويسر عما تقدمه البشرية من جديد كل يوم في عالم المعرفة والعلوم، وفي هذا الصدد حاولت جاهداً أن أتخير في التعامل مع المصطلحات الفنية – سواء عن طريق الترجمة أو التعريب – ألفاظاً عربية سهلة تؤدي المعنى بوضوح ودقة دون صعوبة في النطق أو إثقال على السمع، ودون أن يعني ذلك التقليل من أهمية اللغات الأجنبية وأن لغتنا العربية تتبوأ مكانة متقدمة بين اللغات الأخرى وتلاحق التطور العلمي وتنقله إلى المهتمين والدارسين بنفس القدر الذي يصدر به في مختلف أنحاء العالم. وأحسب أن يكون هذا الكتاب في متنه باللغة العربية هو الأول من نوعه في المجال الذي خصص له، ولقد آثرت أن يكون شاملاً وجامعاً للعديد من الموضوعات والمعلومات المتعلقة بصناعة البترول في الجانب الرئيس منها الّذي يعرف بنشاط الاستكشاف والإنتاج (E & P) والذي يتسم بنزعته الجسورة وطبيعته المليئة بالمخاطر العالية والتحديات الكبيرة التي يواجهها، لذلك فقد أطلقوا عليه "النشاط ضد التيار" upstream activity، ولنتخيل ماذا يجب علينا أن نفعله إذا ما فكرنا في السباحة "نحو أعلى النهر" وما يتطلبه منا من مقّاومة كبيرة وقدرة فائقة لمصارعة هذا التيار، إننا وّحتى هذه اللحظة ليس لدينا تقنية تحدد بجلاء وبصورة مباشرة مواقع تواجد البترول تحت السطح، حتى ولو تمكنا من العثور على هذا الكنز الدفين كيف سنتعامل معه وبأي وسيلة سوف نستخرجه ونحقق الاستغلال الأمثل له خاصة بعد أن تعاظمت الحاجة إليه كمصدر رئيس للطاقة ومادة أولية في الصناعات البتروكيماوية.. ومن هذا المنطلق فقد حرصت على تغطية هذا الأمر من ألفه إلى يائه كما يقولون، وجاء عنوان الكتاب "البترول والغاز الطبيعي من الجيولوجيا إلى الاستكشاف والإنتاج" ليتناول كافة الأحداث والأنشطة وصولاً إلى الهدف المرجو. ولقد أفردت لهذا الكتاب ثلاثين فصلاً أتيت بها في تسلسل زمني يسهل استيعابه ومسايرته، كما حرصت على صياغة المحتوى العلمي بلغة عربية سهلة وميسّرة بعيدة عن التعقيد، وتوخيت تبسيط المصطلحات العلمية لتكون سهلة الفهم.

وهذا الكتاب - في الواقع - هو حصيلة عمل مضن لسنوات طويلة تربو على نصف قرن أمضيتها في التدريس بالجامعات المصرية والأجنبية لطلاب هندسة البترول وعلوم الأرض التطبيقية لمرحلتي البكالوريوس والدراسات العليا، وكذلك في العمل الصناعي لفترات عديدة في شركات البترول داخل مصر وخارجها، وقد قصدت أن تكون المادة العلمية للكتاب جاذبة ومفيدة للدارسين والعاملين والمهتمين على وجه الخصوص بنشاطات الاستكشاف والإنتاج، وقد تناولت في هذا الشأن أحدث النظريات والتقنيات، كما حرصت على تزويد القارئ بالمراجع العلمية ذات الصلة، إضافة إلى عدد من الأمثلة والدراسات الحقلية كلما اقتضى الأمر ذلك.

ونظراً لتعددية فصول الكتاب وتنوعها (٣٠ فصلاً)، فقد رأينا تقسيم هذا الكتاب إلى ثلاثة أجزاء رئيسة: الجزء الأول منها يتناول جيولوجية البترول والغاز الطبيعي والجزء الثاني يهتم بالاستكشاف والحفر، أما الجزء الثالث فيتطرق للإنتاج وهندسة البترول، وفيما يلي نبذة عن كل فصل على حدة.

يتناول الفصل الأول من الكتاب تعريفاً تمهيدياً للبترول وارتباطه بالإنسان عبر التاريخ الطويل وكيفية توزيع هذه الثروة الطبيعية في العالم وما لدينا من احتياطيات بترولية من الزيت الخام والغاز الطبيعي وأهمية العلوم الجيولوجية والجيوفيزيائية في استكشاف البترول وفرص النجاح المحتملة، كما يتطرق الحديث إلى بنية الأرض والغلاف الصخري ونظريتي الانجراف القاري وتكتونية الألواح.

ويتناول الفصل الثاني بالشرح الزمن الجيولوجي وعمر الأرض ومبدأ الانتظامية والوتيرة الواحدة وكيفية تعيين العمر المطلق والنسبي للصخور والعمود الجيولوجي ومقياس الزمن الجيولوجي وتاريخ هذا الكوكب والأزمنة والتجمعات البترولية.

ويقدم الفصل الثالث عرضاً لأنواع المعادن المكونة للصخور والخصائص الطبيعية لها وتصنيفاً للصخور المختلفة التي تشكل القشرة الأرضية والدورات الجيولوجية والأحواض الترسيبية الكبيرة ذات الأهمية في النشاط البترولي.

أما الفصل الرابع فيتناول العمليات الجيولوجية التي تتعرض لها القشرة الأرضية وتشمل التجوية والتعرية واللاتوافق والعوامل المؤثرة وارتباطاتها بتواجد البترول من عدمه.

ويناقش الفصل الخامس التشوهات الصخرية والتراكيب الجيولوجية الحادثة من تجعدات وصدوع وفواصل وتشققات وأهمية ذلك بالنسبة للتجمعات البترولية وكيف أنها هدف رئيس في عمليات البحث والتنقيب.

ويتعرض الفصل السادس لوصف صخور الخزانات البترولية والظروف البيئية التي أحاطت بنشأتها وتصنيف هذه الصخور لتشمل في المقام الأول خزانات الحجر الرملي والأحجار الكربوناتية المختلفة.

أما الفصل السابع فقد تكرس للتعريف بأنواع الخرائط والقطاعات الجيولوجية المختلفة وأهميتها لتمثيل البيانات ذات الاهتمام وعلى الأخص بالنسبة للخرائط التحتسطحية والتي تعتبر الأساس الذي يقوم عليه استنتاج البنيان الجيولوجي ومعالمه.

ويناقش الفصل الثامن أنواع المصايد البترولية والعوامل التركيبية والطبقية والليثولوجية المسببة لها وإمكانية أن تكون هذه المصايد خاوية دون احتوائها على البترول لافتقادها للمعايير والظروف المهيأة لذلك.

ويعرض الفصل التاسع لمناقشة حول نشأة البترول والغاز الطبيعي والنظريات المفسرة لتلك النشأة والمواد المصدرية للبترول والعوامل والظروف البيئية المؤثرة في التحول البترولي.

ويناقش الفصل العاشر هجرة البترول من الصخر المصدر إلى الصخر الخزان والنظريات المفسرة لهذه الهجرة وتجمع البترول داخل الصخور الخزانية مع شرح لخصائصها الأساسية من حيث المسامية والنفاذية والتشبع بالماء والهيدروكربون.

ويعرض الفصل الحادي عشر لشرح موجز لطبيعة الزيت الخام والغاز وكيميائية هذه الهيدروكربونات وما تحتويه من مركبات أخرى عضوية وغير عضوية ووحدات قياس الخام.

أما الفصل الثاني عشر فقد أفردناه لطرق الاستكشاف الجيولوجي والجيوفيزيائي والجيوكيميائي في البحث والتنقيب عن البترول مع مناقشة خاصة للاستكشاف السيزمي لما يشكله من أهمية بالغة في هذا الشأن ومدى ما يقدمه من فاعلية كبيرة.

وينتقل الكتاب إلى فصل جديد يتناول بالشرح المرحلة التالية للنشاط الاستكشافي والتي تستهدف التأكد والتحقق من وجود البترول بمنطقة المسح ليكون لنشاط الحفر الدور البارز والرئيس، وقد خصص الفصل الثالث عشر ليكون انطلاقة تمهيدية شارحاً بإيجاز أنواع عقود الحفر السائدة وتجهيز وإعداد الموقع للحفر والطرق المختلفة لهذا النشاط.

ويركز الفصلان الرابع عشر والخامس عشر على تقنية الحفر الرحوي الحديث ومكوناته الأساسية وطاقم العمل بالموقع والأساليب الهندسية المستخدمة لحفر الآبار العمودية إلى الآبار المائلة فالآبار الأفقية والممتدة وكذا الحفر بالأنبوب الملفوف وغيرها من التقنيات الحديثة.

أما الفصل السادس عشر فيتناول بالشرح المشكلات البئرية والمخاطر التي تتعرض لها عمليات الحفر والأضرار الناجمة عن ذلك وكيفية معالجتها.

ويتناول الفصل السابع عشر أمور السلامة والبيئة في النشاط البترولي وما ينبغي اتباعه للارتقاء بوعي العاملين من أجل أمنهم وسلامتهم وتقليص الحوادث والأضرار التي قد تنجم بسبب عدم الالتزام بمعايير واشتراطات الأمن والسلامة، وكذا الإبقاء أثناء العمل على بيئة نظيفة خالية من التلوث والانبعاثات الضارة.

ويأتي الفصل الثامن عشر بمحتوى ضخم فرضته طبيعة وتعددية وأهمية المصادر والأدوات المستخدمة في تقييم واختبار التكوينات الجوفية من سجلات الطين والعينات اللبية وتسجيلات الآبار والاختبارات الإنتاجية تهيئة لاتخاذ القرار في ضوء النتائج قبيل إكمال البئر والشروع في إنتاجها من عدمه.

أما الفصل التاسع عشر فقد تكرس لشرح عملية إكمال الآبار وأساليبها المختلفة ومكوناتها من أنبوب التغليف والسمنتة وأنبوب الإنتاج والتجهيزات السطحية، كما يتضمن الفصل شرحاً للرفع الاصطناعي وطرائقه المتعددة باستخدام الغاز والمضخة الغاطسة والهيدروليكية والنفاثة وغيرها.

ويعرض الفصل العشرون لمناقشة المرافق والتسهيلات اللازمة لمعالجة الخام المنتج وأجهزة الفصل وتخزين الخام في الصهاريج المعدة لذلك والاختبارات والقياسات ذات الصلة.

ولأهمية النشاط البحري وما تم مؤخراً من إنجازات بترولية هائلة فقد أفردنا الفصل الحادي والعشرين لعمليات الحفر البحري وأنواع المنصات المقامة لحفر وإنتاج الآبار وكذا الإكمالات والانجازات تحت سطح البحر.

ويأتي الفصل الثاني والعشرون ليضم بين ثناياه شرحاً لكيفية صيانة وإصلاح الآبار بسبب ما تتعرض له هذه الآبار من مشكلات وأحداث معوقة أثناء عملية الإنتاج والعوامل التي تؤثر على تلك الآلية وإمكانية استخدام الرفع الاصطناعي بأساليبه المتعددة.

ويناقش الفصل الثالث والعشرون آلية الدفع وسلوك الخزانات البترولية أثناء عملية الإنتاج ويتناول الدفع بالغاز والماء والتصريف بالجاذبية والعوامل المؤثرة في ذلك والمعدل الأقصى للفاعلية الإنتاجية وكذا استخدام الدفع الاصطناعي عند الاقتضاء.

أما الفصل الرابع والعشرون فقد تكرس لعمليات إنتاج الزيت الخام والغاز الطبيعي وفق الخطة المقررة لتنمية الحقل والتي بموجبها يتحقق العائد الاقتصادي الأمثل، وفي هذا الشأن تبرز أهمية الحفاظ على ضغط الخزان ومتابعة الخصائص الخزانية على مدى أطول فترة زمنية ممكنة، وتنشيط الآبار، وكذا رصد بعض الظواهر الإنتاجية ذات المعالم السلبية وكيفية تقليص فرص حدوثها.

ولأهمية تقديرات الاحتياطيات البترولية باعتبارها أصولاً مالية للشركة المالكة فقد أفردنا الفصل الخامس والعشرين للتعريف بهذه الاحتياطيات وتصنيفاتها المختلفة وكيف أن التقديرات ذات طبيعة ديناميكية يزداد الوثوق بها ويتقلص الغموض في حساباتها من مرحلة الاستكشاف إلى التقييم إلى التنمية والاستغلال.

وأما الفصل السادس والعشرون فقد تكرس لكيفية إدارة الخزانات البترولية وترشيد إنتاجيتها، وذلك أنه خلال مرحلة التنمية ومن اليوم الأول لبدء الإنتاج لابد من مراقبة الخزان الجوفي ومتابعته بكافة الوسائل والعمل على تعظيم إنتاجيته وبأقل تكلفة مع التركيز على أهمية الدراسات التكاملية في هذا الخصوص.

ويتطرق الفصل السابع والعشرون إلى مناقشة طرق الاستخلاص المحسن والذي يهدف إلى الحصول على كميات إضافية من المخزونات الهيدروكربونية والتي لم يكن بالإمكان استخلاصها بصورة طبيعية بواسطة آليات الدفع داخل الخزان الجوفي.

ويتركز الفصل الثامن والعشرون حول موضوع ذي أهمية كبيرة في النشاط البترولي حيث يتناول بالشرح التخطيط ومراقبة المشروعات والعقود، فالمشروع هو مهمة وهدف يتطلب تحقيقه حسب مواصفات محددة وضمن إطار زمني وتكلفة معينة وخلال مراحل بدءاً من جدوى المشروع إلى التشغيل والمراجعة النهائية، وحيث يكون للعقود المبرمة أهميتها الاقتصادية والتنفيذية.

أما الفصل التاسع والعشرون فيتناول اقتصاديات البترول في مرحلتي الاستكشاف والتنمية وكذلك التعريف بالتدفقات النقدية والمصروفات الرأسمالية والتشغيلية والعائدات المالية والربحية ونظم التعامل في ظل التشريعات والاتفاقيات البترولية المبرمة.

ويأتي الفصل الثلاثون ليكون خاتمة الكتاب.. ولكي يذكرنا بأن لكل حقل عمراً افتراضياً، ونهاية "سعيدة" بعد عطاء فياض دام لسنوات عديدة وحان الآن التخلي عن الموقع وتركه في حالة نظيفة دون تلوث بيئي يضر بالعباد والبلاد فربما كانت العودة إليه ذات يوم ليدب فيه النشاط من جديد.

هذا وقد ألحقت بهذا الكتاب فهرساً للمصطلحات العلمية والفنية التي وردت بالكتاب مرتبة حسب الأبجدية الإنجليزية وقد تم اختيار هذه المصطلحات بالرجوع إلى عدد من المعاجم المختلفة بالإضافة إلى ما اجتهدت إليه اعتماداً على الخبرة المكتسبة في هذا المجال.

وبعد.. فإني آمل أن يخدم هذا الكتاب قطاعاً عريضاً من القراء والمهتمين بصناعة البترول الحيوية وأن يعود بالفائدة المرجوة في نشر العلم وتفهمه وتوطينه بلغتنا العربية، وما زال في اعتقادنا أننا لم نستكشف بعدُ إلا النذر اليسير من الكنوز والثروة البترولية التي تمكث في الأرض.

لقد ساعدني في إعداد هذا الكتاب أفراد كثيرون ممن تربطني بهم طبيعة العمل سواء تزاملت معهم أو كانوا من بين تلامذتي وقدموا لي العون والتضحية وشجعوني على مواصلة هذا العمل وإنجازه بالشكل الذي جاء عليه وإني أتوجه بالشكر والامتنان لهم جميعاً، كما إني مدين على وجه الخصوص لكل من الطالبين عمر جويلي وحازم العشري بقسم التعدين والبترول بكلية الهندسة – جامعة الأزهر لمساعدتي في طباعة عدد كبير من فصول الكتاب على الحاسوب وكذلك السيدة غادة جابر من مركز الشرق الأوسط الإقليمي للنظائر المشعة للدول العربية لتعاملها بصبر وإتقان في إخراج مسودة الكتاب والأشكال والجداول ومعجم المصطلحات العلمية على النحو المطلوب.. سائلاً الله أن يجعل هذا الكتاب خالصاً لوجهه تعالى.

سليم زيدان

الجزء الأول

جيولوجية البترول والغاز الطبيعي

الفصل الأول
البترول والإنسان والأرض

البترول عبر التاريخ:

يعتبر الزيت الخام والغاز الطبيعي من المواد الهيدروكربونية والتي تتركب من عنصرين أساسيين هما الكربون والهيدروجين، ولفظة البترول petroleum هي مصطلح من أصل لاتيني ذي مقطعين هما petra (صخر) وoleum (زيت أو نفط) أي زيت الصخر، ولا يعني هذا المصطلح الزيت الخام crude oil فقط بل يقصد به أيضاً كافة صور التواجدات البترولية في الطبيعة سواء كانت السائلة أو الغازية أو شبه الصلبة أو الصلبة والتي سوف نتناولها بالشرح فيما بعد.

ويتباين الزيت الخام في خصائصه الطبيعية فقد يكون ثقيلاً من حيث الكثافة واللزوجة مما يصعب إنتاجه أو يكون خفيفاً يسهل إنتاجه وبالتالي يرتفع سعره ويزداد الطلب عليه، كما قد يحتوي الخام على نسب عالية من الكبريت والشوائب الأخرى التي تقلل من درجة الجودة، كذلك فإن الغاز الطبيعي قد تختلف صفاته بسبب احتوائه على نسب عالية من الغازات الأخرى مثل النيتروجين وثاني أكسيد الكربون وبعض الشوائب الأخرى مما يؤثر على قيمته الحرارية ودرجة احتراقه وسعره بالأسواق.

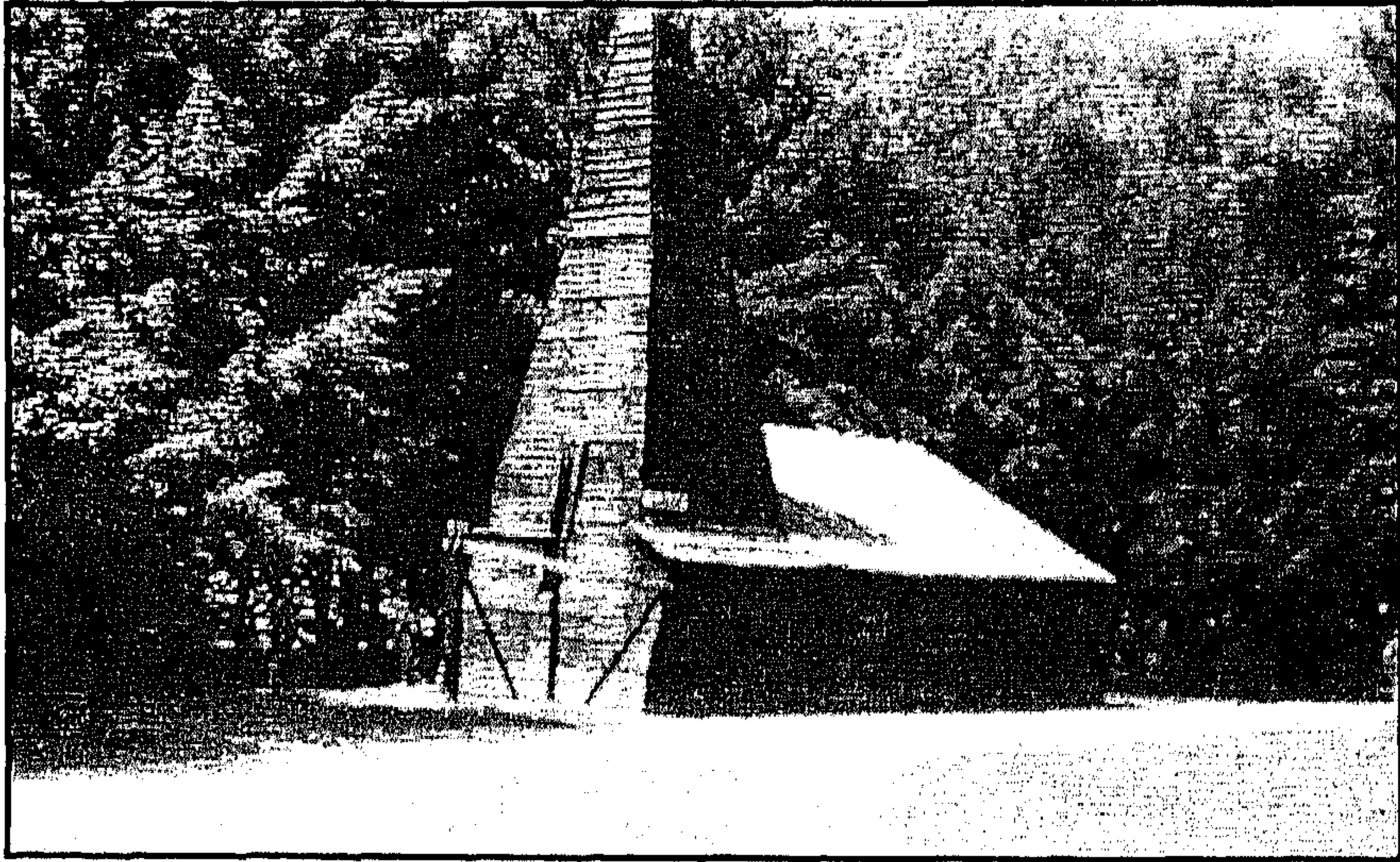
ولكي يمكن العثور على البترول وتحقق عمليات البحث والاستكشاف أهدافها بنجاح لا بد أن تتوافر ثلاثة شروط: أولها وجود المصدر (الأم) وهو صخر يتميز بثرائه بالمادة العضوية التي تكونت أساساً من بقايا الكائنات النباتية والحيوانية التي تراكمت وتحللت بعد دفنها في باطن الأرض على مدى الأزمنة الجيولوجية الغابرة إلى أن تحولت فيما بعد إلى المادة البترولية بفعل الحرارة والضغط والعوامل البيئية الأخرى، ونظراً لأن صخور المصدر لا تتمتع بالخصائص الخزانية من حيث المسامية والنفاذية فإن المادة البترولية الناشئة لا تلبث أن تنتقل إلى البيئة المناسبة حيث الصخر الخزان القادر على احتواء هذه المادة وانسيابها خلاله، أما الشرط الثالث فهو توافر آلية تعمل على اصطياد الزيت والإبقاء عليه داخل الخزان الجوفي ومنعه من الهروب أو التسرب إلى سطح الأرض وتعرف هذه الآلية بالمصيدة البترولية.

وتشكل الصخور الرسوبية التي تتكون منها القشرة الخارجية للأرض المصادر الرئيسة للتجمعات البترولية حيث يعمل بعضها كصخور مصدرية والأخرى كصخور خازنة. ويتكون الصخر الرسوبي من تجمع الحبيبات الناتجة عن عمليات التجوية والتعرية للصخور الأصلية كما سنتناول ذلك في فصل لاحق حيث تتحول هذه الحبيبات في النهاية إلى صخر رسوبي نتيجة التحام الحبيبات المكونة له بواسطة مواد لاحمة، كما قد يتكون الصخر الرسوبي بطريقة كيميائية مثل الملح الصخري والجبس، أو أن يكون عضوياً من بقايا وإفرازات الكائنات الحية مثل بعض أنواع الحجر الجيري والطباشير. وجدير بالذكر أن ٩٩٪ من الصخور الرسوبية بالقشرة الأرضية تتكون أساساً من الصخور الطينية والرملية والجيرية كما أنها ترسبت في هيئة طباقية فوق بعضها البعض على مدى الحقب الجيولوجية المتعاقبة والتي امتدت إلى ملايين السنين وفي هذه الطبقات أمكن العثور على البترول في طياتها.

ولقد عرف الإنسان البترول منذ آلاف السنين واستغله القدماء بصورة بدائية محدودة، وكانوا يعثرون عليه من النشوع والنزازات السطحية دون حفر أو تعدين، واستخدم الزيت الثقيل والقطران والبيتومين والأسفلت – وهي تواجدات بترولية ثقيلة تطايرت منها مكوناتها الخفيفة بسبب تعرضها للعوامل الجوية – في أغراض البناء كمادة لاحمة للأحجار وفي بناء السفن والطلاء، كما استخدمها قدماء المصريين بالإضافة إلى ذلك في تحنيط جثث الموتى وعلاج بعض الأمراض وإضاءة المشاعل، وجدير بالذكر أن في مصر بمنطقة خليج السويس الغنية بحقول البترول هناك جبل اسمه جبل النزازات Gebel Nazzazat حيث توجد بقع زيتية مترسبة على السطح بين الحبيبات الصخرية.

ومن ناحية أخرى فقد كان الغاز الطبيعي والمنبعث من باطن الأرض موضع إجلال أحياناً بوصفه نيراناً أزلية eternal fires أقبل الأهالي في بلاد فارس القديمة على عبادتها إعتقاداً منهم أنها قوة أزلية خارقة ولها قدسيتها. وفي هذا السياق يسجل لنا التاريخ على مدى الزمن الطويل مشاهدات بترولية لعدد من الرحالة في إيطاليا وروسيا وبحر قزوين وترينداد وبورما عن وجود برك وعيون للزيت ونبوع للغاز في الأماكن التي ارتادوها، بيد أنه إلى أن انتصف القرن التاسع عشر كانت الإضاءة تتم عن طريق زيت خاص يؤتى به من مصادر حيوانية أو نباتية إلى أن جاء استنباطه من الفحم في عام ١٨٥٠ وما هي إلا عدة سنوات حتى شاع استخدام "زيت الفحم" على نطاق واسع في المصابيح.

وفي عام ١٨٥٩ حفر الكولونيل دريك Colonel Edwin L.Drake أول بئر بحثاً عن البترول في قرية تيتوسفيل بولاية بنسلفانيا حيث عُثر على الزيت عند عمق ٧٠ قدماً، وقد اعتبر هذا الكشف نقطة تحول في صناعة البترول الحديثة (شكل ١-١)، ولو أنه وقبل ذلك كانت تنتج كميات قليلة من الزيت في روسيا ورومانيا، كذلك فلم يكن قد مضى على حفر بئر دريك سوى تسع سنوات حتى تم اكتشاف البترول في مصر عام ١٨٦٨، وذلك أثناء العمل في منجم لاستخراج الكبريت في منطقة جمسة Gemsa بالبحر الأحمر، وتوالت الإكتشافات البترولية بعد النجاح الذي صادفته بئر دريك، وكانت الآبار، منذ حفر تلك البئر حتى بعد مُضي شطر من القرن العشرين، تُحفر بالقرب من مواضع النز oil seeps ولم يكن ثمة تنقيب بالمعنى الحديث حتى أواخر القرن التاسع عندما بدأ الباحثون عن البترول استخدام الأساليب الجيولوجية، وفي سنة ١٨٨٥ تم اكتشاف العديد من حقول البترول استناداً إلى النظرية القائلة أن الزيت يتجمع في أعالي الطبقات الصخرية المثنية والمعروفة الآن بنظرية الطيات المحدبة أو القباب the anticlinal theory، إلا أن النظرية قد تغيرت بعد ذلك وبدأ الاستخدام العلمي الحديث والتطبيقات التكنولوجية في أواسط القرن العشرين حيث لم تشهد البشرية تقدماً علمياً وتكنولوجياً منذ نشأتها وحتى اليوم كالذي نراه ونعيشه في الوقت الحاضر ليس فقط على اليابسة بل وفي المياه العميقة للبحار والمحيطات والتي يصل عمقها إلى أكثر من ٢٠٠٠ متر.



شكل ١-١: صورة أرشيفية لبئر دريك التاريخية بولاية بنسلفانيا الأمريكية وبرجها الخشبي.

البترول والغاز الطبيعي في العالم والاحتياطيات المؤكدة:

في مستهل القرن العشرين زادت أهمية البترول في الصناعة والحياة العامة وأصبح دعامة أساسية في تقدم الدول ورُقيها وتعددت وسائل استخداماته كمصدر رئيس للطاقة بل تخطى ذلك ليصبح المادة الإستراتيجية الأولى في الصناعات البتروكيماوية التي غدت جزءاً أساسياً لاحتياجات حياتنا اليومية وربما شارك في حل مشكلة الغذاء التي يعاني منها العالم في الوقت الحاضر ولا ندري كيف سيمكن حلها مستقبلاً بسبب تفاقمها يوماً بعد يوم.

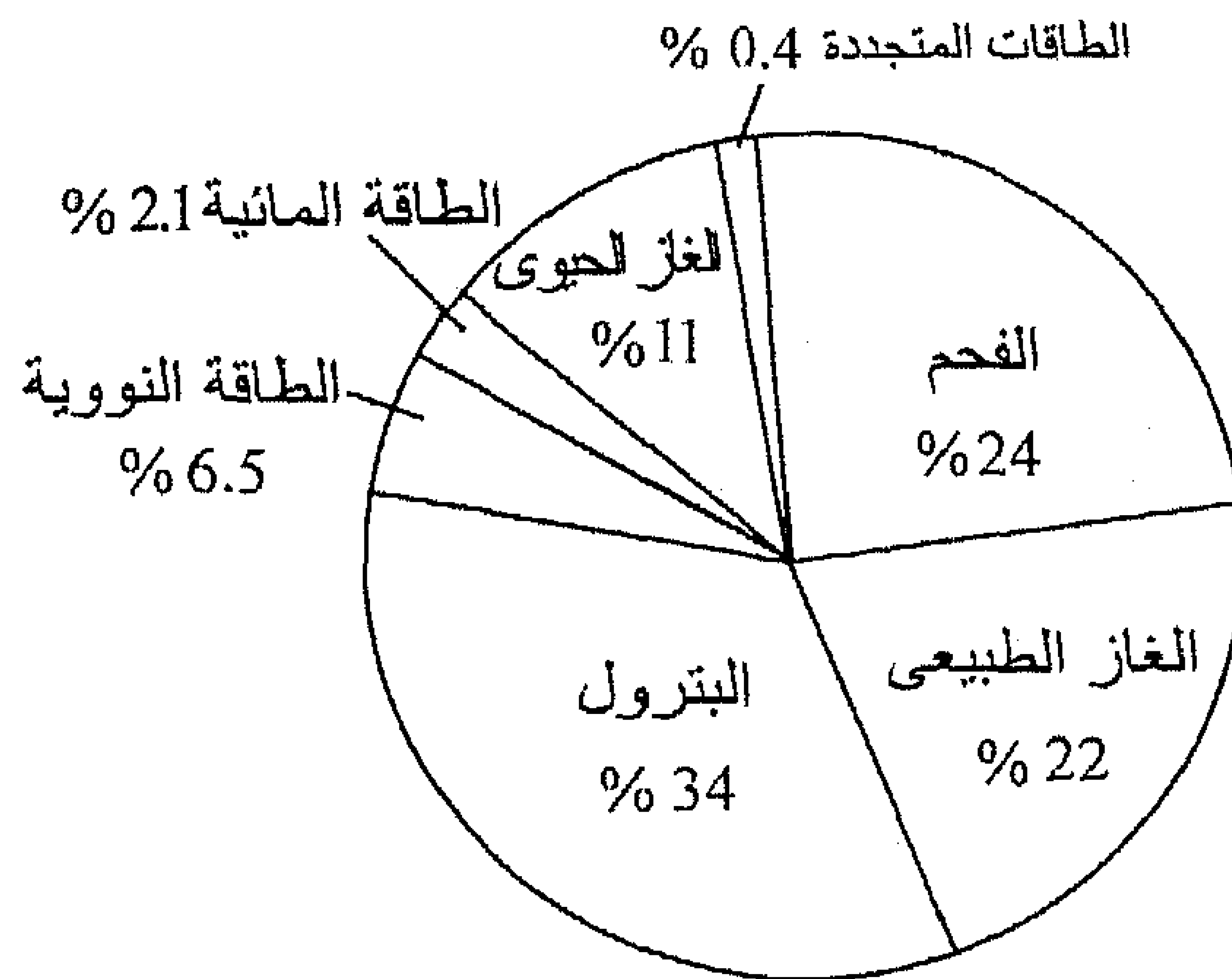
ولقد أظهرت أنشطة الاستكشاف في العالم أن البترول يوجد في جميع القارات ولكن بنسب متفاوتة، فهناك مناطق ذات إمكانيات بترولية ضخمة وأخرى ذات إمكانيات متواضعة وربما يرجع ذلك إلى الظروف الجيولوجية والبيئية السائدة في تلك المناطق والتي تسببت في هذه المفارقات.

ولكي نتعرف على هذه الإمكانيات بلغة الأرقام دعنا نستخدم مصطلح "الاحتياطي البترولي" petroleum reserve، ويعرف هذا الاحتياطي بأنه كمية الزيت الخام أو الغاز الطبيعي الموجودة في باطن الأرض بمنطقة ما وعلى الأخص الكميات المؤكدة من وجودها بشيء معقول من اليقين في الحقول المكتشفة وأنه يمكن استخلاصها اقتصادياً بالأساليب المتبعة.

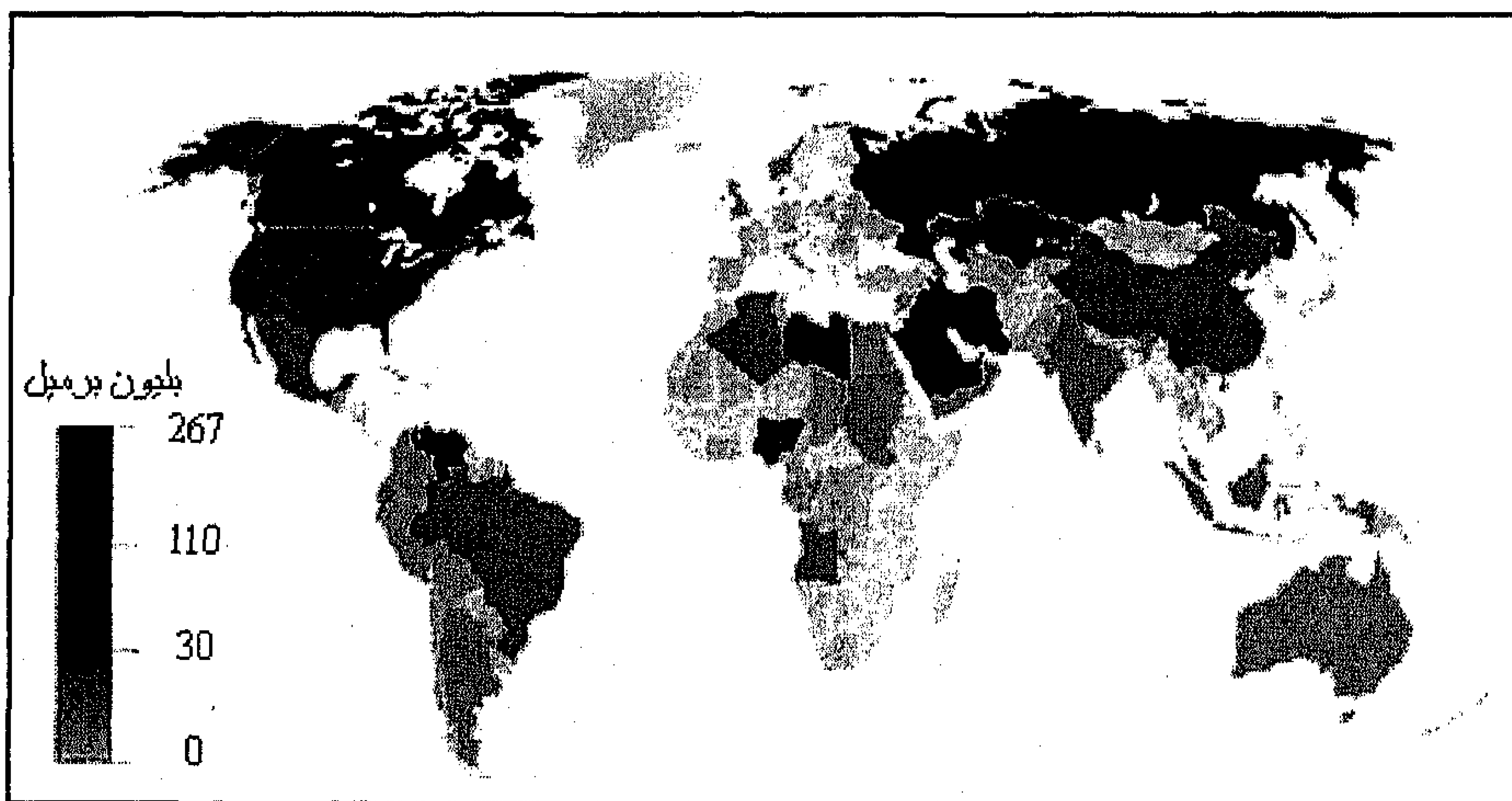
ونشير إلى أن الاحتياطيات البترولية هي أرقام ديناميكية تقترب أو تبتعد عن الحقيقة بمقدار تحقيقها لشروط فنية لازمة لدقة التقدير، كما تعتمد التقديرات على عوامل أخرى منها العوامل الاقتصادية والعوامل البيئية وظروف الإنتاج والأُسس العلمية التي بنيت عليها هذه التقديرات والخبرة الحرفية للقائمين بهذا العمل.

وتكتسب الاحتياطيات البترولية أهميتها لكونها رصيداً للبشرية جمعاء، كما يستند إليها من يرغب في امتلاك ناصيتي القوة والتقدم، حيث إن البترول ما زال هو مصدر الطاقة الرئيس بالعالم. وتمثل المصادر البترولية ما يزيد عن ٥٥٪ من إجمالي مصادر الطاقة المولدة بالعالم خلال عام ٢٠٠٩ مقارنةً بمصادر الطاقة الأخرى كالوقود الصلب (الفحم) والطاقة المائية الكهربائية والطاقة الشمسية والوقود النووي وغيرها من الطاقات الجديدة والمتجددة (شكل ١-٢) والتي ما زالت باهظة التكاليف وتحتاج إلى المزيد من الدراسات والأبحاث لكي يتعاظم دورها، ومن المتوقع أن يستمر اعتماد العالم والدول الصناعية والمتقدمة بوجه خاص على البترول كمصدر رئيس للطاقة خلال العقود القادمة، ونظراً

لهذه الأهمية الإستراتيجية فقد اكتسبت المناطق ذات الثراء في الاحتياطي العالمي مكانة خاصة وأصبحت مركزاً للصراعات الإقليمية والدولية.

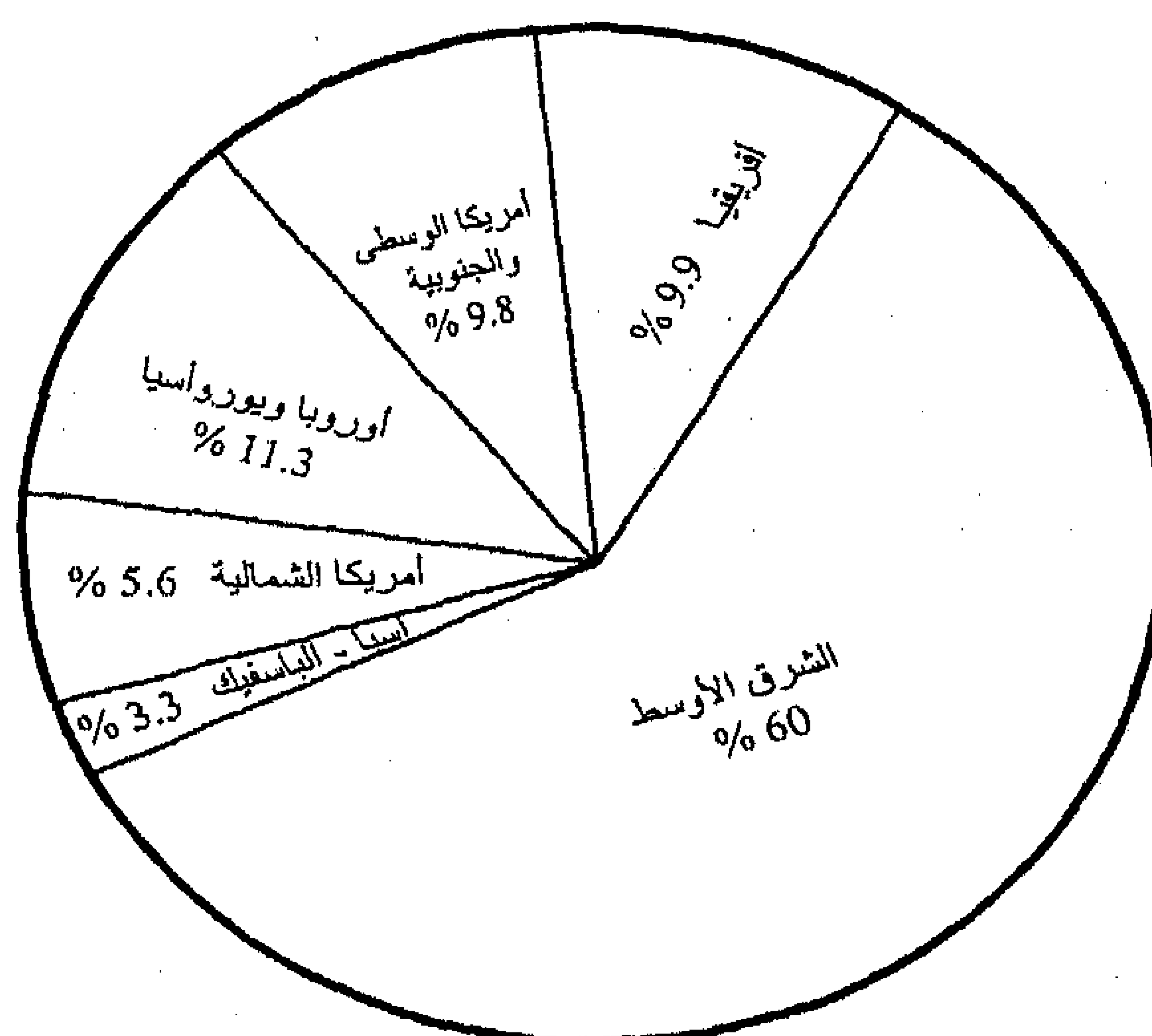


وبنظرة على الخريطة البترولية (شكل ١-٣) نجد أن العالم يرتكز حالياً على عدد من المحاور التي تتميز باحتياطياتها البترولية الضخمة وتشمل بصورة خاصة مناطق الشرق الأوسط، وخليج المكسيك / الكاريبي، ومنطقة بحر الشمال. حيث يضم محور الشرق الأوسط: إيران والعراق والكويت وعمان وقطر والسعودية والإمارات، ويضم محور خليج المكسيك/ الكاريبي: ساحل الخليج بالولايات المتحدة والمكسيك وكولومبيا وفنزويلا وترينداد، أما محور بحر الشمال فيضم المملكة المتحدة والدول الإسكندنافية والأراضي المنخفضة.



شكل ١-٣: خريطة توضح المناطق ذات الاحتياطيات البترولية في العالم.

ويتصدر محور الشرق الأوسط المحاور البترولية الأخرى حيث يستحوذ على حوالي ٦٠٪ من إجمالي الاحتياطي العالمي من الزيت الخام حيث يبلغ ٧٥٤ بليون برميل مقابل ١٢٥٨ بليون برميل للإجمالي العام، وذلك حسب إحصائية بريتش بتروليم لعام ٢٠٠٨ كما هو موضح بالشكل ١-٤ والجدول ١-١ الذي يبين توزيع احتياطيات الزيت الخام في المناطق المختلفة من العالم في نهاية عام ٢٠٠٨، ويوضح الجدول ١-٢ موقف الدول العشرين الأولى في العالم حسب تلك الإحصائية - حيث تتصدر دول الشرق الأوسط (السعودية وإيران والعراق والكويت) المراكز الأولى باحتياطيات بترولية تبلغ حوالي ٦١٨ بليون برميل.



شكل ١-٤ : الاحتياطيات العالمية من الزيت الخام حيث يحتل الشرق الأوسط المرتبة الأولى حسب إحصائيات ٢٠٠٨.

جدول ١-١: توزيع احتياطيات الزيت الخام في مناطق العالم المختلفة حتى نهاية عام ٢٠٠٨

(المصدر: بريتش بتروليم)

المنطقة	بليون برميل	بليون طن	٪
الشرق الأوسط	٧٥٤،١	١٠٢	٥٩،٩
أوروبا ويوروآسيا	١٤٢،٢	١٩،٢	١١،٣
أفريقيا	١٢٥،٦	١٦،٦	٩،٩
أمريكا الوسطى والجنوبية	١٢٣،٢	١٧،٦	٩،٨
أمريكا الشمالية	٧٠،٩	٩،٧	٥،٦
آسيا - الباسيفيك	٤٢،٠	٥،٦	٣،٣
الإجمالي	١٢٥٨	١٧٠،٨	٪١٠٠

البليون: ألف مليون

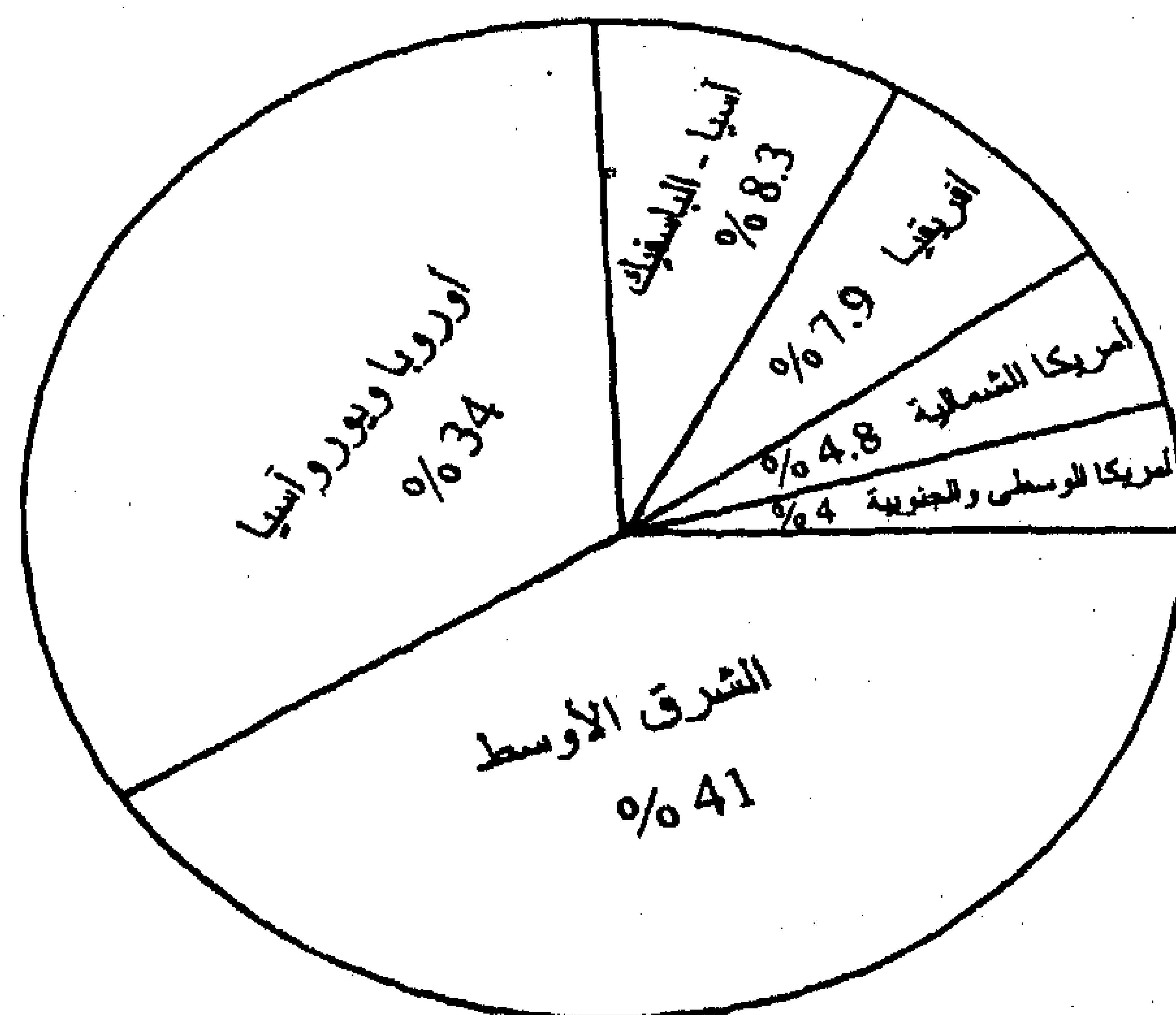
جدول ١-٢: العشرون دولة الأولى بالعالم في احتياطيات الزيت الخام حتى نهاية عام ٢٠٠٨

م	البلد	بليون برميل	بليون طن	م	البلد	بليون برميل	بليون طن
١	السعودية	٢٦٤،١	٣٦،٣	١١	الولايات المتحدة	٣٠،٥	٣،٧
٢	إيران	١٣٧،٦	١٨،٩	١٢	كندا	٢٨،٦	٤،٤
٣	العراق	١١٥	١٥،٥	١٣	قطر	٢٧،٣	٢،٩
٤	الكويت	١٠١،٥	١٤،٠	١٤	الصين	١٥،٥	٢،١
٥	فنزويلا	٩٩،٤	١٤،٣	١٥	أنجولا	١٣،٥	١،٨
٦	الإمارات	٩٧،٨	١٣،٠	١٦	البرازيل	١٢،٦	١،٧
٧	روسيا	٧٩	١٠،٨	١٧	الجزائر	١٢،٦	١،٥
٨	ليبيا	٤٣،٧	٥،٧	١٨	المكسيك	١١،٩	١،٦
٩	كازاخستان	٣٩،٨	٥،٣	١٩	أذربيجان	٧،٠	١،٠
١٠	نيجيريا	٣٦،٢	٤،٩	٢٠	الهند	٥،٨	٠،٨

البليون: ألف مليون

وبالنسبة لاحتياطيات الغاز الطبيعي فما زالت منطقة الشرق الأوسط تحتل الصدارة بين بقية مناطق العالم حيث يُقدر حجم الاحتياطيات المؤكدة من الغاز بهذه المنطقة بنحو ٢٦٨١ تريليون قدم مكعبة مقارنةً بالاحتياطي العالمي الذي يبلغ ٦٥٣٤ تريليون قدم مكعبة، وذلك حسب إحصائية بريتش بتروليم لعام ٢٠٠٨ تليها منطقة أوروبا – يوروآسيا فآسيا – الباسيفيك وتأتي أفريقيا في المرتبة الرابعة مسجلة احتياطياً للغاز الطبيعي بنحو ٥١٧ تريليون قدم مكعبة وهو رقم مطمئن للغاية – وقد تعاظم مقداره نظراً للاكتشافات التي أُضيفت لرصيد هذه القارة وعلى الأخص بالنسبة لما تحقق في مصر مؤخراً (دلتا النيل والبحر المتوسط) إضافةً إلى بلدان أخرى في القارة ذاتها.

ويبين الجدول ١-٣ والشكل ١-٥ توزيع احتياطيات الغاز الطبيعي في المناطق المختلفة من العالم حسب إحصائية بريتش بتروليم حتى نهاية عام ٢٠٠٨، كما يبين الجدول ١-٤ ترتيب دول العالم العشرين الأولى لاحتياطيات الغاز الطبيعي حتى نهاية الفترة ذاتها حيث تحتل روسيا المركز الأول برصيد ١٥٢٩ تريليون قدم مكعبة تليها إيران بواقع ١٠٤٦ تريليون قدم مكعبة ثم قطر برصيد ٨٩٩ تريليون قدم مكعبة وتحتل ليبيا المركز العشرين برصيد ٥٤،٤ تريليون قدم مكعبة من الغاز الطبيعي.



شكل ١-٥: احتياطيات الغاز الطبيعي في مناطق العالم المختلفة.

وتجدر الإشارة بأن الاحتياطي العالمي من الزيت والغاز الطبيعي في تزايد مطرد وذلك من واقع الدراسة الحديثة المنشورة في مجلة أويل آند جاز Oil & Gas Journal في أوائل عام ٢٠١٠ ويرجع السبب في ذلك إلى ما يشهده العالم من اكتشافات بترولية في مناطق متفرقة بل وعدد من البلدان التي لم يكن لها وجود يذكر على الخريطة البترولية كأستراليا والصين وأوزباكستان ، حيث يُقدر الاحتياطي العالمي حالياً من الزيت الخام بنحو ١٣٥٤ بليون برميل والغاز الطبيعي بحوالي ٦٦٠٠ تريليون قدم مكعبة، وهو أمر يدعو إلى الاطمئنان وليحتفظ البترول بمكانته العالمية دون قلق.

جدول ١-٣: توزيع احتياطيات الغاز الطبيعي في المناطق المختلفة من العالم حتى نهاية عام ٢٠٠٨

	تريليون قدم مكعبة	تريليون متر مكعب	٪
الشرق الأوسط	٢٦٨٠،٩	٧٥،٩١	٤١
أوروبا ويوروآسيا	٢٢٢٠،٨	٦٢،٨٩	٣٤
آسيا – الباسيفيك	٥٤٣،٥	١٥،٣٩	٨،٣
أفريقيا	٥١٧،٥	١٤،٦٥	٧،٩
أمريكا الشمالية	٣١٣،١	٨،٨٧	٤،٨
أمريكا الوسطى والجنوبية	٢٥٨،٢	٧،٣١	٤،٠٠
الإجمالي العالمي	٦٥٣٤،٠٠	١٨٥،٠٢	٪١٠٠

تريليون: ألف ألف مليون

جدول ١-٤: احتياطيات الغاز الطبيعي للدول العشرين الأولى في العالم

م	البلد	تريليون قدم مكعبة	تريليون متر مكعب	م	البلد	تريليون متر مكعبة	تريليون متر مكعب
١	روسيا	١٥٢٩,٢	٤٣,٣	١١	العراق	١١١,٩	٣,١٧
٢	إيران	١٠٤٥,٧	٢٩,٦١	١٢	النرويج	١٠٢,٧	٢,٩١
٣	قطر	٨٩٩,٣	٢٥,٤٦	١٣	أستراليا	٨٨,٦	٢,٥١
٤	أوكرانيا	٢٨٠,٦	٧,٩٤	١٤	الصين	٨٦,٧	٢,٤٦
٥	السعودية	٢٦٧,٣	٧,٥٧	١٥	مصر	٧٦,٦	٢,١٧
٦	الولايات المتحدة	٢٣٧,٧	٦,٧٣	١٦	كازاخستان	٦٤,٤	١,٨٢
٧	الإمارات	٢٢٧,١	٦,٤٣	١٧	الكويت	٦٢,٩	١,٧٨
٨	نيجيريا	١٨٤,٢	٥,٢٢	١٨	كندا	٥٧,٧	١,٦٣
٩	الجزائر	١٥٩,١	٤,٥٠	١٩	أوزباكستان	٥٥,٨	١,٥٨
١٠	أندونيسيا	١١٢,٥	٣,١٨	٢٠	ليبيا	٥٤,٤	١,٥٤

والجدول ١-٥ يبين تطور الاحتياطي العالمي من البترول والغاز الطبيعي خلال السنوات العشر من ٢٠٠١ وحتى ٢٠١٠ (المصدر: مجلة أويل آند جاز- ديسمبر ٢٠٠٩).

جدول ١-٥: تطور الاحتياطي العالمي من البترول والغاز الطبيعي

الفترة أول يناير	الزيت الخام (بليون برميل)	الغاز الطبيعي (تريليون قدم مكعبة)
٢٠١٠	١٣٥٤,٢	٦٦٠٩,٣
٢٠٠٩	١٣٤٢,٢	٦٢٥٤,٤
٢٠٠٨	١٣٣١,٧	٦١٨٥,٧
٢٠٠٧	١٣١٧,٤	٦١٨٢,٧
٢٠٠٦	١٢٩٣,٣	٦١٠١,١
٢٠٠٥	١٢٧٧,٧	٦٠٤٠,٢
٢٠٠٤	١٢٦٥,٨	٦٠٦٨,٣
٢٠٠٣	١٢١٢,٩	٥٥٠١,٤
٢٠٠٢	١٠٣١,١	٥٤٥١,٣
٢٠٠١	١٠٢٨,٤	٥٢٧٨,٥

وإضافةً إلى ذلك فإن الاحتياطي العالمي للغاز الطبيعي في مطلع ٢٠١٠ إذا ما تم تحويله إلى ما يكافئه من الزيت الخام فإننا نحصل على ما يقرب من ١٣٢٢ بليون برميل زيت مكافئ، وإذا ما أضيف هذا الرقم إلى احتياطي الزيت الخام لذات الفترة وهو ١٣٥٤ بليون برميل نكون قد حصُلنا على إجمالي الاحتياطي العالمي للبترول بواقع ٢٦٧٦ بليون برميل، وهو مطمئن للغاية ويفي باستهلاك البشرية لعدة عقود قادمة خاصةً إذا ما أُحسن استخدامه وتكرس العمل في الوقت ذاته لتعظيم دور المصادر الأخرى من الطاقة الجديدة والمتجددة من أجل تخفيف الطلب على البترول في هذا الشأن والتركيز على استخداماته الأخرى وعلى الأخص في الصناعات البتروكيماوية.

الجيولوجيا واستكشاف البترول:

الجيولوجيا أو علم الأرض geology هي كلمة من أصل إغريقي ge بمعنى الأرض وlogus بمعنى الكلام المنطقي أو العلمي، فالجيولوجيا إذن هي العلم الذي يختص بدراسة أصل الأرض وتاريخها وبنيانها، والدارس لهذا العلم لابد أن يكون لديه إلمام جيد بالعلوم الأخرى ذات الارتباط كالكيمياء والفيزياء والبيولوجيا والفلك وغيرها خاصةً إذا ما أخذنا في الاعتبار أن الأرض وتراكيبها وأحداثها الجيولوجية معقدة ولا يسهل إدراكها ومتابعتها إلا بالدراسة المتأنية والعميقة، كما أن الجيولوجي يعتمد في عمله على المشاهدة وقدرته على التحليل الدقيق للأحداث التي أثرت ولا زالت تؤثر في كوكبنا الذي نعيش فوقه، وفروع علم الأرض كثيرة فمنها الجيولوجيا التاريخية والجيولوجيا الطبقية والجيولوجيا التركيبية وجيولوجيا التعدين وجيولوجيا البترول وغيرها، ونحن لسنا بصدد تناول هذه الفروع والغوص في تفاصيلها فهذا أمر خارج عن نطاق هذا الكتاب، لكن ما يهمنا هو أن نعرض في هذا الفصل تعريفاً مبسطاً عن جيولوجيا البترول petroleum geology والتي يتركز حولها فصول الكتاب وارتباطها الوثيق بعمليات الاستكشاف والإنتاج.

وجيولوجيا البترول هي العلم الذي يتناول استخدام المعلومات الجيولوجية سطحية كانت أو تحتسطحية في البحث واستكشاف البترول وأيضاً في استغلاله اقتصادياً، وبالطبع فإن المتطلبات الأساسية الجيولوجية للتجمعات البترولية هي واحدة على مستوى العالم، فالاستكشاف في منطقة كالشرق الأوسط مثلاً لا يختلف عنه في الشرق الأقصى أو أمريكا

فالعناصر الأساسية واحدة وللعثور على البترول يتطلب الأمر أن يكون هناك صخر مصدري وصخر مسامي وآلية لاصطياد الزيت الخام أو الغاز الطبيعي.

وعندما يدور الحديث عن علم الأرض وتطبيقاته في صناعة البترول فإن العنصر الاقتصادي يصبح أيضاً أمراً حتمياً بالنسبة لأولى الأمر، وعلى الجيولوجي أن يترجم أفكاره إلى مفاهيم تسعى إلى تحقيق الهدف وهو العثور على البترول والحصول على عائد مادى مربح.

وعلى الرغم من أن أي كشف بترولي لا يتحقق إلا بالحفر فإن تحديد موقع الحفر ذاته هو مهمة الخبير الجيولوجي وما يستلزم في هذا الشأن من توقع لوجود المصيدة البترولية والعمق اللازم لاختراقها للتعرف على الخزان الجوفي وتحديد حدوده وكلها أمور جيولوجية تدخل في صميم عمله، ولا يتأتي ذلك إلا عن طريق المعرفة المتكاملة والمستنبطة من البيانات الجيولوجية والجيوفيزيائية والهندسية والتي تمكنه في النهاية من رسم الخرائط والقطاعات الجيولوجية المختلفة ذات العلاقة بالتجمعات البترولية محل الاهتمام، كذلك فإن معرفة طبيعة التجمعات البترولية في الرواسب النهرية أو الصخرية مثلاً دون معرفة جيدة بطبيعة الرمال المكونة لها ومن أين أتت وكيف ترسبت وما هي خصائصها الليثولوجية وما هي المؤثرات التكتونية عليها وهذه كلها أمور جوهرية يتطلبها العمل الاستكشافي لكي يحقق الغرض منه وهو ما سوف نوضحه لاحقاً، ومن ناحية أخرى فإن تنفيذ هذا العمل بمنطقة ما يجري من خلال برنامج طموح يتم الموافقة عليه من قبل المسئولين ويتضمن هذا البرنامج العناصر الرئيسة له من حيث الجدول الزمني لتنفيذه وبنوده الفنية والمالية بالإضافة إلى النواحي الأخرى المتعلقة بالبيئة والأمن الصناعي واحتمالات النجاح، ذلك أن الاستكشاف عمل تكلفته باهظة للغاية ونتيجته غير مضمونة البتة، ثم أن هذه التكلفة آخذة في الازدياد خاصةً بامتداد البحث والتنقيب إلى المناطق النائية والتكوينات الجيولوجية في المياه العميقة والفائقة العمق (أكثر من ٢٥٠٠ متر) والتي تحتاج إلى تقنيات عالية وتكلفة كبيرة للغاية، ورغم المصروفات الباهظة فليس لدينا حتى اليوم من وسيلة تجزم بوجود البترول في موقع جديد وكل ما يمكننا القول بأن ثمة تكويناً تحتسطحياً يتوسم تواجد البترول به وليس أمامنا من سبيل إلا الحفر للتأكد من وجود البترول هناك من عدمه.

إن استمرار البحث عن مصادر جديدة للبترول، واستزادة من المعرفة الواردة من التكوينات التي يُعرف وجود البترول بها أمر لاغنى عنه لضمان موارد كافية في المستقبل لتلبية الطلب المتزايد على البترول وتلك عملية طويلة الأجل إذ قد يقتضي بين وقت الاكتشاف والبدء في إنتاج الخام مدة زمنية تتراوح من خمس إلى عشر سنوات وربما أكثر من ذلك، ويرجع السبب في هذا إلى الانشغال في مواصلة جهود البحث والتقييم وحفر المزيد من الآبار الاستكشافية والتأكد من حجم المخزون من الزيت أو الغاز المكتشف، بالإضافة إلى أعمال البنية التحتية وتسهيلات الإنتاج اللازمة لعمليات التنمية والاستغلال.

النشاط الاستكشافي ونسبة النجاح:

كما سبق أن ذكرنا أن نجاح عمليات الإستكشاف والبحث عن البترول يتوقف في المقام الأول على المعرفة الجيدة للعلوم الجيولوجية والجيوفيزيائية والتحليل الدقيق للبيانات والتعامل معها بحرفية جادة، بيد أن الحكم على ذلك يقوم على ما يسمى "نسبة النجاح" success ratio أي نسبة عدد الآبار الناجحة إلى عدد الآبار الاستكشافية التي حفرت استناداً إلى مختلف الطرق الاستكشافية، فقد تصل هذه النسبة إلى ١ : ٣٠ إذا كان المسح عشوائياً دون الاستعانة بالطرق العلمية وهذا ما كان يحدث في الماضي حيث كانت العشوائية والملكية الخاصة تغلب على العمل آنذاك ، ولكن مع تطور المفاهيم والسعي من أجل تطبيق النظريات الجيولوجية البحتة تزايدت هذه النسبة لترتفع إلى ١ : ١٠، وفي أواسط العشرينيات من القرن الفائت كانت الخرائط الموضوعة قد شملت معظم ما يمكن رؤيته على وجه الأرض من التكوينات الجيولوجية المحتوية للزيت خاصةً في الولايات المتحدة الأمريكية – باعتبارها رائدة في هذا المجال – فقد نشأت لذلك الحاجة إلى طرق جديدة للعثور على تلك التكوينات التي لم يكن بالإمكان الكشف عنها بالوسائل الجيولوجية المستخدمة آنذاك، وكان أن جرت تجربة الطرق الجيوفيزيائية حيث أدت طرق قياس الجاذبية الأرضية والسيزمية على وجه الخصوص إلى تحسين نسبة النجاح في العمل الاستكشافي وتزايدت لتصل إلى ١ : ٦، وبظهور الكيانات والمؤسسات المهنية وعند الاستعانة بأسلوب التكامل بين الطرق الجيولوجية والجيوفيزيائية ارتفعت نسبة النجاح أكثر فأكثر لتصل أحياناً إلى ١ : ٣ ويؤكد ذلك هذه الإحصائية التي ساقتها مجلة عالم النفط (World Oil, Feb. 1958) حيث كان قد تم في الولايات المتحدة الأمريكية

حفر ٢٤٤٨٢ بئراً استكشافية بحثاً عن البترول كان منها ١٣٩٤٤ بئراً منتجة للزيت الخام و٣١٩٢ بئراً منتجة للغاز الطبيعي و٧٣٤٦ بئراً جافة – أي بنسبة نجاح بلغت ٧٠٪ وهي نسبة مرتفعة للغاية، كما أن نسبة النجاح في الآبار الإنمائية ترتفع كثيراً عنها في الآبار الاستكشافية بسبب وفرة المعلومات الواردة من الآبار اللاحقة وتدني عامل المخاطرة، وتجدر الإشارة إلى أن نسبة النجاح تتفاوت من منطقة لأخرى وفي بلاد الشرق الأوسط تختلف عنها في المناطق الأخرى، كما أن العثور على البترول في حد ذاته لا يعتبر نجاحاً اقتصادياً إلا بعد التأكد من طاقة الخزان الجوفي وقدرته على الإنتاج بمعدل تجاري.

بنية الأرض والغلاف الصخري:

بعد أن عرضنا العلاقة بين البترول والأرض كان علينا – ولمزيد من الفهم – أن نلقي الضوء على بنية هذا الكوكب earth structure الذي يمدنا بكل هذه الثروة الهائلة من الزيت الخام والغاز الطبيعي وغيرها من الثروات الأخرى.

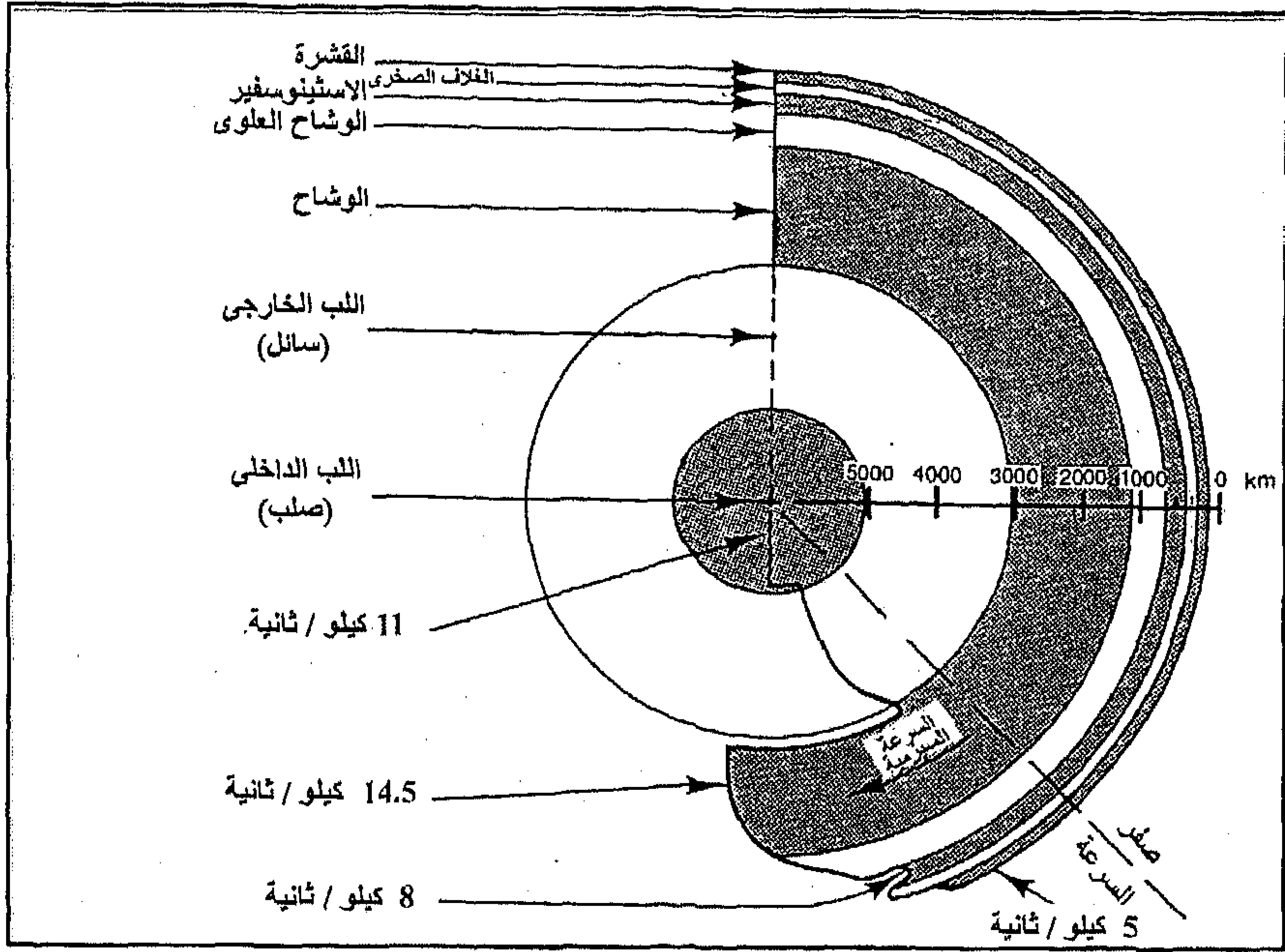
والأرض هي أكبر الكواكب planets الأربعة الموجودة في المجموعة الشمسية (عطارد والزهرة والأرض والمريخ) وهي على شكل كرة ولكنها غير كاملة التكور فهي منتفخة قليلاً عند خط الاستواء حيث تقل القيمة الظاهرية للجاذبية، ومفلطحة قليلاً عند القطبين حيث تنعدم قوة الطرد المركزية الناتجة عن دوران الأرض، ويبلغ طول قطرها القطبي حوالي ١٢٦٤٠ كيلومتراً وهو يقل بذلك حوالي ٤٣ كيلومتراً عن طول قطرها الاستوائي، كما تبلغ المساحة السطحية للأرض نحو ٥٠٠ مليون كيلومتر مربع، منها حوالي ١٣٠ مليون كيلومتر مربع (أي حوالي ٢٩٪) أرض يابسة بينما الباقي ويمثل ٧١٪ فتغطيه المياه. وتدور الأرض حول الشمس كما أنها تدور أيضاً حول محورها الذي يصل بين القطبين، وتتكون الأرض من الهواء والماء واليابسة وهي ما يطلق عليها بالأغلفة الثلاثة: الغلاف الجوي atmosphere والغلاف المائي hydrosphere والغلاف الصخري lithosphere وهذا الأخير هو الجزء الصلب الذي يوجد تحت الغلافين الجوي والمائي، وسوف نتناوله بالشرح نظراً لأهميته الخاصة في البحث والتنقيب عن البترول وغيره من الثروات الطبيعية الأخرى حيث يتكون هذا الغلاف من معادن وصخور تكون بدورها الكتل القارية وأحواض المحيطات، وحيث تنتشر أنشطة الاستكشاف لما يزخر به هذا الغلاف من كنوز ثمينة.

الغلاف الصخري للأرض:

لم يتمكن الإنسان حتى يومنا هذا من الوصول بطريقة مباشرة إلى لُب الأرض، فأكبر عمق وصل إليه جهاز حفر إلى الآن قد تجاوز بقليل العشرة كيلومترات، وهو عمق قليل جداً إذا ما عرفنا أن العمق المقدر للب الأرض حوالي ٥٥٠٠ كيلو متر، وذلك بناء على النتائج التي توصلت إليها الدراسات السيزمية والمتعلقة بسرعة وسلوك الموجات الصوتية داخل الأرض، كذلك فإن معظم المعلومات التي عرفناها عن الغلاف الصخري جاءتنا من دراستنا للمواد السطحية للأرض بالإضافة إلى تلك التي حصلنا عليها من حفر الآبار وأعمال المناجم والدراسات الجيوفيزيائية (سيزمية – جاذبية – مغناطيسية – كهربية – إشعاعية – حرارية وغيرها)، كما أن الحركات التكتونية التي تضرب الكرة الأرضية من آن لآخر (زلازل – براكين – عمليات هدم وبناء) قد تسببت في ظهور صخور على سطح الأرض كانت قبل ذلك موجودة تحت السطح وعند أعماق بعيدة للغاية، وأدت الدراسات بالتالي إلى الحصول على معلومات لم تكن متوافرة من قبل عن هذا الكوكب، وبناء على كل ذلك فقد أمكن تقسيم الغلاف الصخري إلى ثلاثة نُطق (نطاقات) مختلفة في تركيبها الكيميائي هي (القشرة – الوشاح – اللب) والشكل رقم ١-٥ يبين رسماً توضيحياً للتركيب الداخلي للأرض.

(١) القشرة:

القشرة crust هي الطبقة العلوية من الغلاف الصخري للأرض ويختلف سمكها تحت المحيطات عنه في القارات، فهي تكون تحت المحيطات حوالي خمسة كيلومترات وتسمى القشرة المحيطية oceanic crust وتتكون في مجملها من صخور البازلت وتبلغ كثافتها حوالي ٣ جم/ سم^{٣} بينما يتراوح سمك القشرة القارية continental crust بين ٣٠ و٧٠ كيلومترا وفي المتوسط ٤٠ كيلومترا وتتكون أساساً من صخور الجرانيت وكثافتها نحو ٢,٧ جم/ سم^{٣} (راجع شكل ١-٦ و١-٧).

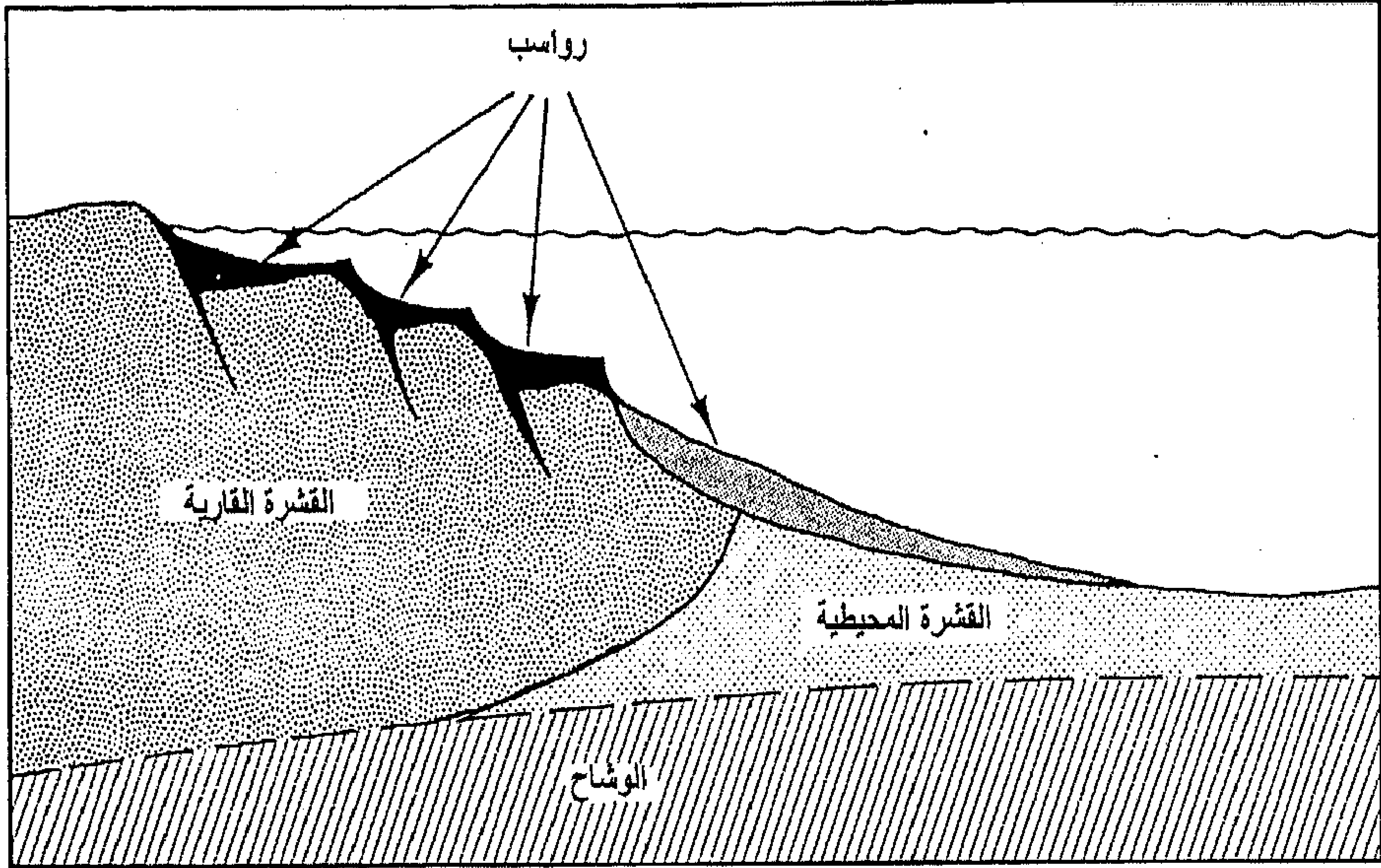


شكل ١-٦: التركيب الداخلي للأرض.

(٢) الوشاح:

يوجد الوشاح mantle أسفل القشرة الأرضية ويُقدر سمكه بنحو ٣٠٠٠ كيلومتر ويحتوي الجزء العلوي منه على ما يُعرف بطبقة الأسينوسفير asthenosphere أو الطبقة اللدنة والتي يبلغ سمكها نحو ٢٠٠ كيلومتر، وفي هذه الطبقة تتوازن درجة الحرارة والضغط مما يجعل حالة الأسينوسفير قريبة من نقطة الانصهار حيث يمكنها ذلك من الانسياب إذا ما تعرضت لأية إجهادات، وفي هذا الصدد فإن النشاط البركاني وتشوهات القشرة الأرضية تحدث نتيجة الحركة داخل هذه الطبقة. كذلك فإن الوشاح يتكون أساساً من المعادن الغنية بسيليكات الحديد والمغنسيوم الأعلى كثافةً من صخور القشرة الأرضية، ولما كان الوشاح أثقل من القشرة فإن الموجات السيزمية تنتشر فيه بسرعة أعلى، وهذا التغير في السرعة يحدث عند قاع القشرة الأرضية والجزء العلوي من الوشاح، ويتميز ذلك بوجود انقطاع واضح ومُحدد يُسمى انقطاع موهوروفيتش Mohorovicic discontinuity أو موهو Moho نسبةً إلى عالم الزلازل اليوغوسلافي موهوروفيتش أول من أشار إلى هذا الانقطاع عام ١٩٠٩ وأوضح أن هذا الانقطاع يقع تحت سطح الأرض

عند عمق يتراوح ما بين ٣٥ و٥٥ كيلومتراً حيث تزداد سرعة الموجات السيزمية (الأولية والثانوية) إلى أكثر من ثمانية كيلومترات في الثانية مما يدل على تغير في كثافة الصخور أسفل الموهو (شكل ١-٧).



شكل ١-٧: العلاقة بين القشرة المحيطية والقشرة القارية.

(٣) اللب:

وهو قلب أو نواة core الأرض ويبلغ قطره ١٨٠٠ كيلومتر ويتكون أساساً من الحديد والنيكل وعناصر أُخرى، ولذا فهو أكثر نطاقات الأرض كثافةً، ويُقسم اللب إلى جزئين: جزء خارجي ربما يكون في حالة سائلة ويُسمى اللب الخارجي outer core ويصل سمكه إلى ٢٢٧٠ كيلومتر ويكون منصهراً بسبب تعادل الضغط ودرجة الحرارة فيه مما يساعد على بقائه في الحالة السائلة، ويُعضد ذلك هو أن الموجات السيزمية الثانوية لا تنفذ من خلاله كما أن الموجات الأولية تنتقل بسرعة أقل، أما الجزء الآخر من اللب فيسمى اللب الداخلي inner core ويصل سمكه إلى ٢١٦ كيلومتراً (الشكل ١-٧) وعلى الأرجح أن يكون في حالة صلبة بسبب وجوده عند ضغط مرتفع وحرارة شديدة كما أنه قد يتكون من النيكل والحديد وهي مواد ثقيلة للغاية ويصل وزنها النوعي إلى أكثر من ١٢.

الانجراف القاري وتكتونية الألواح:

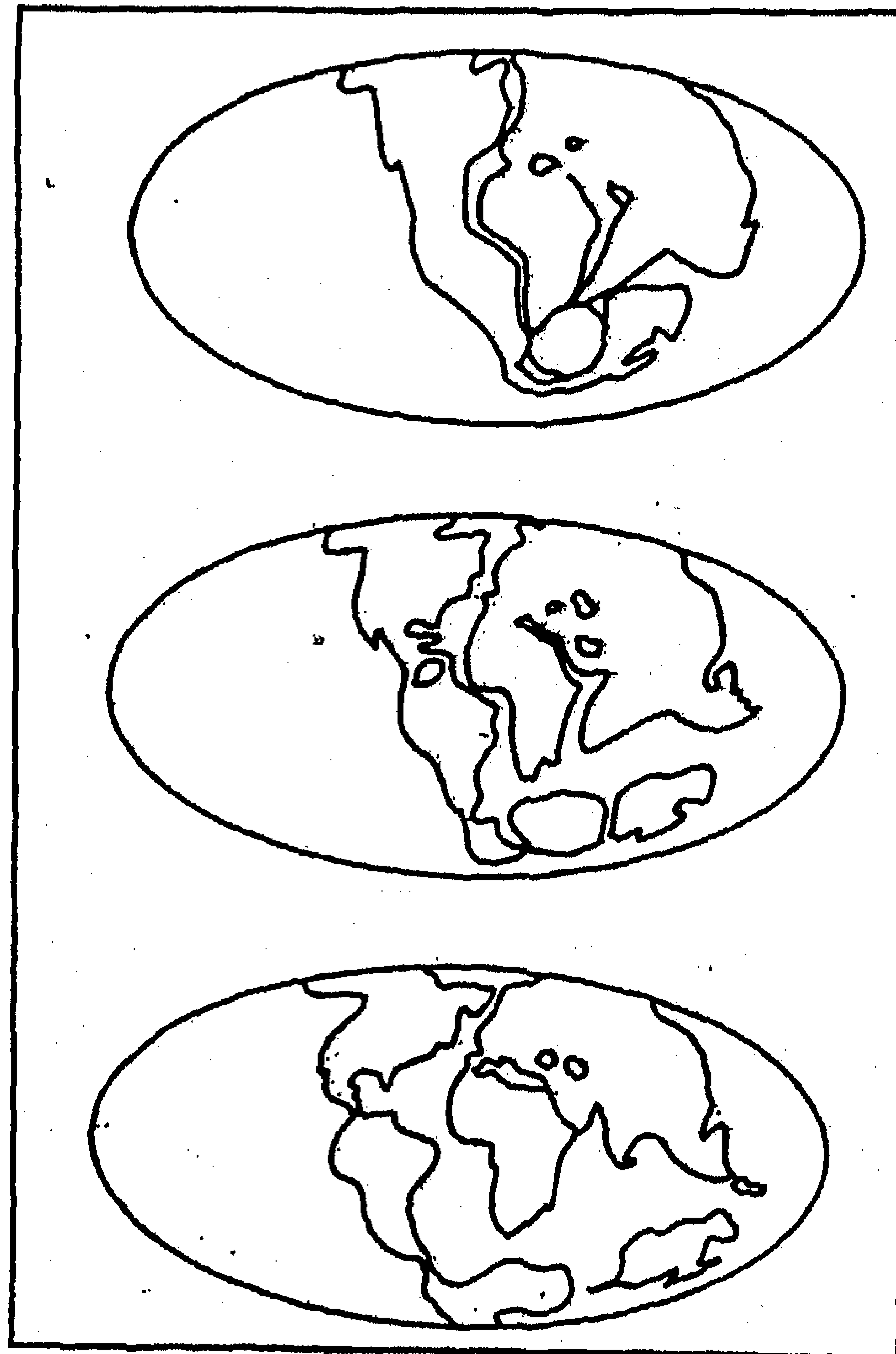
دوام الحال من المحال.... هذا قول حق تعلمناه في مستهل دراستنا لعلم الجيولوجيا، فعلى الأرض وفي باطنها هناك قوى تعمل دون انقطاع وأحدثت تغيرات هائلة طرأت على الأرض ومعظم هذه التغيرات الكثيرة استلزم تكونها مدداً زمنية طويلة جداً واستغرق ملايين السنين، وتضم هذه التغيرات الحركات الأرضية والنشاط البركاني وعمليات البناء والهدم – فالقارات الخمس التي يتكون منها عالمنا اليوم كانت على الأرجح ذات يوم قارة واحدة هائلة ثم تكسرت إلى أجزاء عديدة انجرفت بعيداً عن بعضها البعض، كذلك فإن الزلازل التي تضرب كوكبنا من حين لآخر فتخرج الأرض أثقالها وتتصدع الصخور وتنزاح من مواقعها وربما صاحب ذلك البراكين الثائرة لتلقي بحممها المنصهرة ورمادها الملتهب، كذلك فإن سلاسل الجبال العظمى ومعظم تشوهات البنيات الجيولوجية هي مما تُعرف بالحركات التكتونية tectonic movements (من أصل إغريقي tekton بمعنى يبني) وعمليات الصعود والهبوط للكتل القارية، وغير ذلك من الشواهد والأدلة على عدم ثبات القشرة الأرضية.

ولتفسير أسباب حدوث الحركات التكتونية وما ينتج عنها من تشوهات للقشرة الأرضية قَدَّم الباحثون عدداً من النظريات لسنا في حاجة إلى مناقشتها في هذا الكتاب ولكننا سنكتفي بعرض لاثنتين منهما نظراً لحداثتهما نسبياً وأيضاً لارتباطهما بتكون حقول البترول والمصايد البترولية في العالم، وهاتان النظريتان هما: الانجراف القاري وتكتونية الألواح.

١- الانجراف القاري:

يرجع تطور نظرية الإنجراف القاري continental drift إلى عالم المناخ الألماني (ألفريد فاجنر Alfred Wagener, 1915) والذي اعتمد في نظريته على تحليل المعلومات الجيوفيزيائية ومضاهاة المعلومات الحفرية والجيولوجية، وتقول النظرية إن القارات الحالية كانت جزءاً واحداً من قارة عملاقة supercontinent تُسمى البانجيا Pangaea التي انقسمت إلى أجزاء منفصلة انجرف بعضها عن بعض وكونت القارات الحالية (شكل ١-٨).

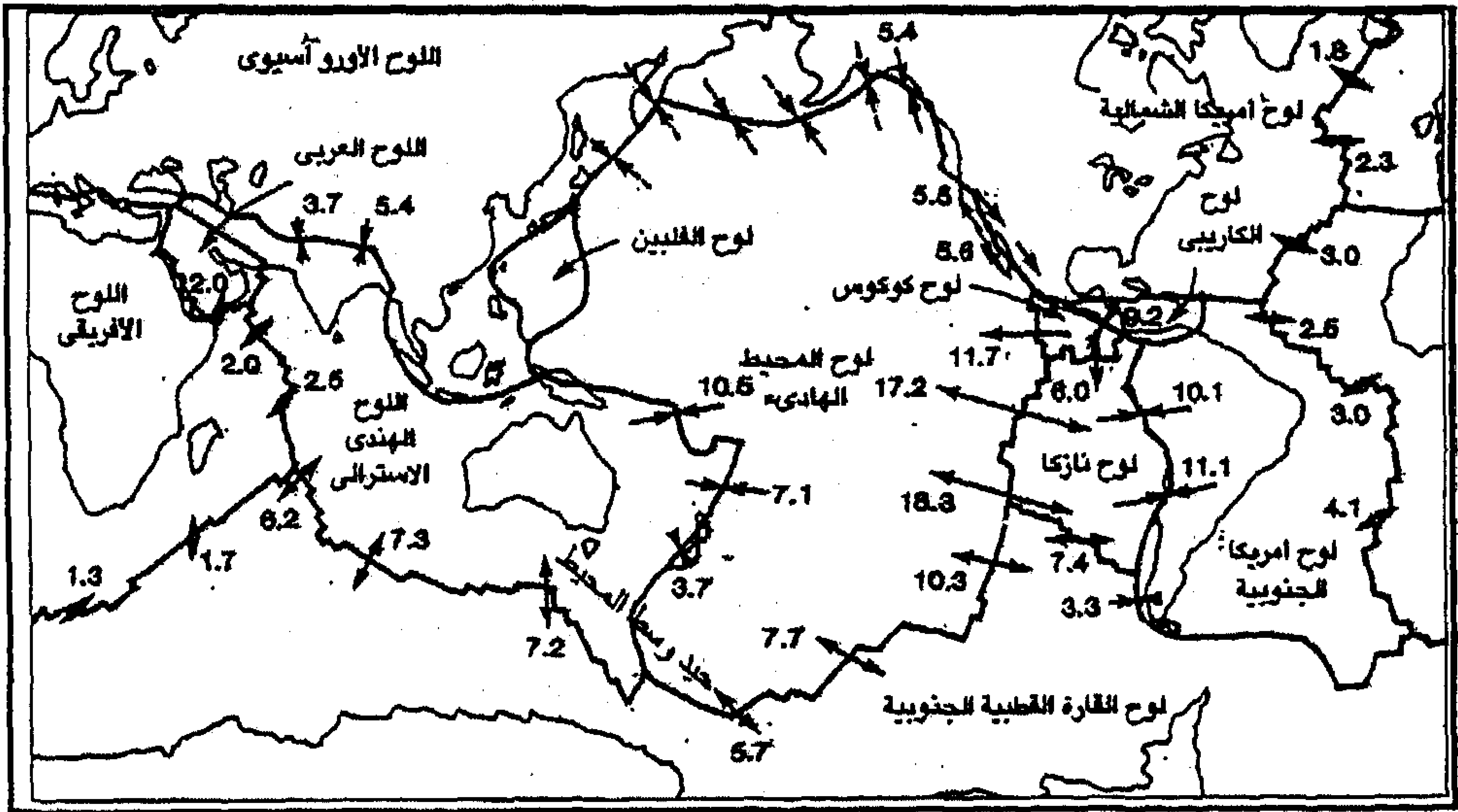
وقد جمع فاجنر والعلماء الذين أيدوا فكرته عدداً من الدلائل التي تدعم هذا التصور منها: تشابه حواف القارات المتقابلة وخصوصاً أمريكا الجنوبية وأفريقيا مما يرجح احتمالية أنها كانت متصلة ببعضها البعض، تشابه الوحدات الصخرية والتراكيب على الشواطئ المتقابلة للمحيطات وخاصةً في نصف الكرة الجنوبي، تشابه المجموعات الحفرية في صخور الكتل القارية المتباعدة الآن والتي لم يكن في مقدورها الانتقال عبر المحيطات التي تفصل بين القارات الحالية، ووجود رواسب المثالج glaciers وهي كتل ضخمة من الجليد المتحرك على سطح الأرض في مناطق متباعدة عن بعضها مثل أفريقيا والهند وأمريكا الجنوبية والتي توجد الآن بعيدة عن الأقطاب الحالية للأرض وأن هذه القارات كانت متلاحمة وبالتالي انساب الجليد فوقها ككُتلة واحدة.



شكل ١-٨: الانجراف القاري لألفريد فاجنر (١٩١٥).

٢- تكتونية الألواح:

تفترض نظرية تكتونية الألواح plate tectonics والتي يرجع ظهورها إلى عام ١٩٦٧ أن القشرة الأرضية تنقسم إلى ستة ألواح كبيرة وعدد من الألواح الصغيرة (شكل ١-٩) والتي يصل سمك كلٍ منها إلى حوالي مائة كيلومتر، وتتحرك الألواح الصلبة جانبياً كوحدات متماسكة مستقلة فوق الطبقة اللدنة (الأسينوسفير) والتي سبق الإشارة إليها. وتختلف الألواح في المساحة وأكبرها مساحةً لوح المحيط الهادي الذي يقع كليةً تقريباً في المحيط، أما بقية الألواح الكبيرة فإنها تشمل كلاً من القشرة القارية والقشرة المحيطية وعلى الجانب الآخر فإن عديداً من الألواح الصغيرة تتكون كليةً من قشرة محيطية مثل لوح الفلبين ولوح نازكا، أو من قشرة قارية، ويمثل اللوح العربي Arabian plate نموذجاً للألواح المتكونة من تلك القشرة.

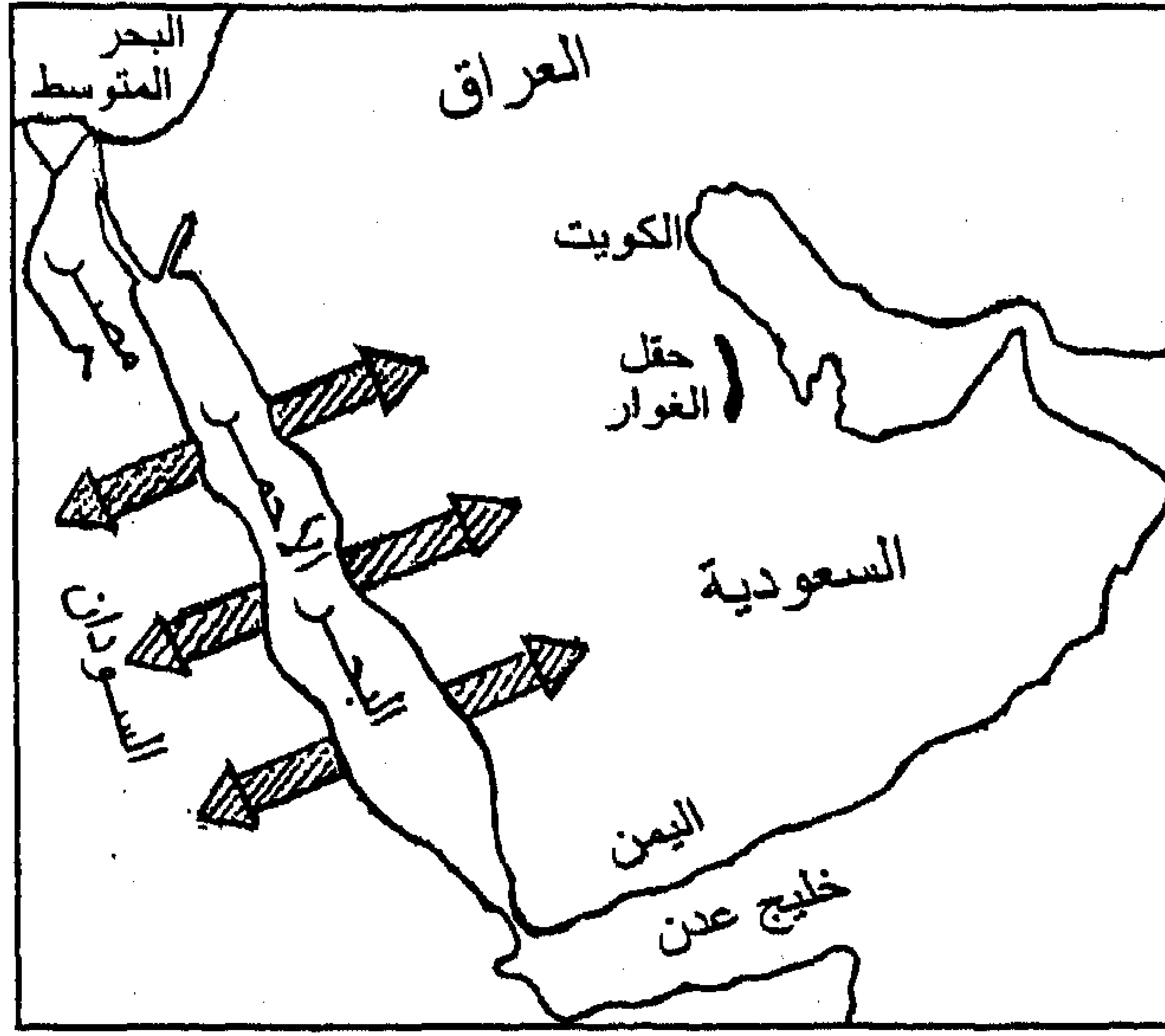


شكل ١-٩: ألواح القشرة الأرضية في الوقت الحاضر واتجاهات تحرك الألواح وسرعة التحرك بالسنتيمتر في العام (هاميلتون - المساحة الجيولوجية الأمريكية).

وبالنسبة لحركة الألواح فإن الاعتقاد السائد هو أن القوى الأساسية المسببة للحركة تأتي من تحرك أجزاء منصهرة من الوشاح العميق لأعلى فتكون مراكز بركانية على سطح الأرض حيث تؤدي هذه المواد الساخنة والمتحركة لأعلى إلى تقبب وتكسر القشرة الأرضية وتنزلق هذه المواد على الجوانب لتكون حيد ridge انتشار في القشرة الأرضية، وتعتبر حواف

الألواح الأماكن التي يحدث فيها أعظم التشوهات للقشرة الأرضية وعند اصطدام الألواح بعضها البعض تحدث أثناء ذلك تفاعلات تؤدي إلى حدوث زلازل وبراكين وهو ما يفسر امتداد أحزمة زلازل الكرة الأرضية على طول حواف الألواح ويؤكد المفهوم الديناميكي للقشرة الأرضية، وبسبب تحرك الألواح فقد لوحظ على سبيل المثال أن لوح أمريكا الشمالية يتحرك إلى الغرب بواقع ٢،٥ سم في العام، كما أن هذا اللوح يتصادم ولوح المحيط الهادي الذي يتحرك ناحية الشمال الغربي ويتسبب في الصدوع والزلازل والبراكين وظهور سلسلة الجبال هناك.

وبصورة عامة فإن العلماء يعتقدون أنه قد حدثت تصادمات بين قارات الأرض مرات عديدة خلال الزمن الجيولوجي تسببت في تشوهات الغلاف الصخري من صدوع وطيات وزلازل وصعود وهبوط الكتل القارية، وعلى الأرجح أن تكون جبال الهيمالايا قد تكونت من اصطدام القارات القديمة وانضغاط الرواسب وبروزها كسلسلة جبال شاهقة، كما إنه في حالة اصطدام لوح أو قشرة محيطية بقشرة قارية قد تتكون خنادق عميقة عند حافة القارة أو تتكون أقواس جزر أو ترتفع جبال ويزداد ميل الانحدار القاري وتكثُر الزلازل والرواسب الفتاتية وتتغير سحن الصخور سريعاً وتُدفن مواد عضوية تحت الرواسب وقد تنشأ أيضاً الظروف الملائمة لتكوين البترول وتجمعه، ومن الأمثلة على ذلك هو أن حيد وسط المحيط Mid-oceanic ridge في البحر الأحمر قد تسبب في تحرك السعودية على اللوح العربي Arabian plate تجاه الشمال الشرقي ليصطدم باللوح الأوروآسيوي، حيث تتضاغط في الوقت الحاضر منطقة الخليج العربي بين هذين اللوحين مكونة بذلك الطيات المحدبة التي تُشكل المصايد البترولية لحقول الشرق الأوسط (شكل ١-٩ و١-١٠)، كما أن التشوه الحادث عن هذه الحركة التكتونية يزداد في شدته ناحية الشمال الشرقي من السعودية نحو إيران والعراق مكوناً بذلك جبال زارجوس Zargos Mountains، ونذكر أن حقل الغوار Ghawar العملاق بالسعودية والأول من حيث احتياطيات البترول في العالم هو أحد نتائج الحركة التكتونية وسوف نتناوله بالتفصيل في فصلٍ لاحق، هذا ويُقدر الاحتياطي القابل للإنتاج من هذا الحقل بحوالي ٨٢ بليون برميل من الزيت الخام.



شكل ١-١٠: خريطة مبسطة توضح حركة الألواح بسبب حيد وسط المحيط في البحر الأحمر وبناء التراكيب الجيولوجية.

وتجدر الإشارة أن حيد وسط المحيط يقع في مركز المحيط الأطلنطي، ويعتبر أطول سلسلة جبال في العالم ويمكن تتبعه لمسافة ٨٠ ألف كيلو متر فهو يمتد تحت المحيط الأطلنطي حول جنوب أفريقيا إلى المحيط الهندي مستمراً حتى أستراليا ثم إلى المحيط الهادي شرقاً (شكل ١-٩)، كما أن لهذا الحيد فروعاً منها ذلك الفرع الذي يمتد إلى خليج عدن والبحر الأحمر، وحيد وسط المحيط عريض للغاية (حوالي ١٦٠٠ كم في المتوسط) كما أنه يرتفع ما بين ١،٦ - ٣ كيلومتر فوق قاع المحيط، ويبرز على سطح المحيط في أيسلنده والآزور التي تكونت من البراكين البازلتية النشطة.

الفصل الثاني
الزمن الجيولوجي

عمر الأرض:

قدر العلماء عمر الأرض earth age ما بين ٤ و٧ بلايين سنة، وأن أقصى عُمر للنيازك meteorites وهي الأجسام السماوية التي تتساقط إلينا من الفضاء الخارجي يُقدر بنحو ٤،٦ بليون سنة، وإذا ما افترضنا أن مكونات المجموعة الشمسية والكون قد تزامنت فلن يقل عمر الأرض بالتالي عن ٤،٥ بليون سنة وهو ما يتفق عليه العلماء في الوقت الحاضر استناداً إلى القياسات العلمية الحديثة باستخدام الطرق الإشعاعية، وبالطبع فإن هذا العمر كبير للغاية إذا ما قورن بمفاهيمنا عن الزمن نحن البشر، كما أنه خلال هذه الفترة الزمنية الطويلة جداً لم تكن هناك فترة استقرار للأرض فدوام الحال من المحال، والمشاهدات والدراسات أوضحت أن تغيرات كبيرة قد حدثت خلال تلك الفترة وتوصل الجيولوجيون إلى فهم أعمق وأعمق لهذا الكوكب الذي نعيش فوقه وما يرتبط بأصله وعمره وتاريخه وأحداثه وبنيته وغيرها، وزخرت الدراسات والمراجع العلمية بعلوم الأرض وتبدد الكثير من الغموض وأصبحت الأرض موضوعاً مثيراً وجذاباً للدارسين، وبالنسبة لما يختص بعمر الأرض وتتابع صخورها ومضاهاتها نود أن نشير إلى مبدأ مهم للغاية له قيمته الجيولوجية والتاريخية ونُلخصه فيما يلي:

الانتظامية (الوتيرة الواحدة):

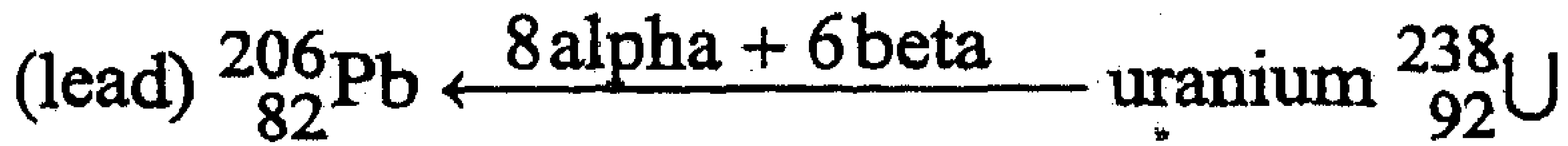
وضع مبدأ الانتظامية principle of uniformitarianism العالم الأسكتلندي جيمس هاتون James Hutton في أواخر القرن الثامن عشر أثناء مشاهداته ودراساته الحقلية عن الوحدات الصخرية وتواجداتها المحلية والإقليمية حيث أشار إلى أن العمليات الجيولوجية والقوانين الطبيعية التي تعمل الآن على تشكيل القشرة الأرضية قامت بالعمل نفسه وبالأسلوب نفسه طوال الزمن الجيولوجي وأنه يمكن تفسير الأحداث الجيولوجية التي وقعت في الماضي بالظواهر والقوى المشاهدة الآن، وعليه فإن الحاضر هو مفتاح الماضي the present is the key to the past وأن التاريخ يعيد نفسه، فملامح الأرض الحالية قد تكونت نتيجة للعمليات الحالية التي تؤثر في الأرض لمدد طويلة من الزمن، وهو ما يفيد في تحديد التكوينات الصخرية وأعمارها النسبية.

العمر المطلق والعمر النسبي للصخور وطرق تحديدهما:

يعرف العمر المطلق absolute age للأحداث والمكونات الجيولوجية بأنه ذلك العمر المحدد والدقيق لها، فيقال مثلاً أن عمر هذا الصخر خمسة ملايين عام، أما العمر النسبي relative age فهو يرتبط بالترتيب الزمني للأحداث أو الصخور منسوباً إلى أحداث أو صخور ذات أعمار سبق تحديدها، وفيما يلي شرح موجز لكيفية تحديد ذلك العمر.

تحديد العمر المطلق:

وتعتمد هذه الطريقة أساساً على الاستفادة من ظاهرة الإشعاعية الطبيعية natural radioactivity والتي تعني انحلال أو اضمحلال العناصر المشعة تلقائياً إلى نواتج غير مشعة خلال فترة زمنية محددة لكل عنصر مشع، حيث وجد أن القشرة الأرضية تحتوي على كثير من المعادن التي يدخل في تركيبها عناصر مشعة مثل اليورانيوم والثوريوم والبوتاسيوم والتي يحدث لها انحلال تلقائي spontaneous decay وبمعدل ثابت لا يتأثر بالتغير في درجات الحرارة أو الضغط أو أيّة عوامل طبيعية أُخرى. وعلى سبيل المثال فاليورانيوم ٢٣٨ عنصر مشع ينحل تلقائياً إلى الرصاص ٢٠٦ وهو عنصر غير مشع ويفقد اليورانيوم المشع أثناء عملية الانحلال جسيمات ألفا وبيتا ليتحول في النهاية إلى الرصاص وذلك حسب المعادلة الآتية:



$$(\text{lead})\ {}^{206}_{82}\text{Pb} \xleftarrow{8\,\text{alpha} + 6\,\text{beta}} \text{uranium}\ {}^{238}_{92}\text{U}$$

ويُطلق على النظير المشع (الأصل) parent وعلى النظير غير المشع (الوليد) daughter، وفي بادئ الأمر تكون نسبة العنصر الأصلي ١٠٠٪ ولكن تتضاءل هذه النسبة وتتزايد لمصلحة النظير الوليد، وإذا كانت النسبة ١:١ مثلاً فهذا يعني أن نصف كمية العنصر المشع الأصل قد تحولت إلى النظير غير المشع عند الفترة الزمنية التي تُعرف بفترة نصف العمر half – life (T½) وهي فترة ثابتة للعنصر المشع الواحد، وقد تتراوح ما بين جزء من الثانية كما في حالة البولونيوم ٢١٦ حيث نصف العمر ٠،١٥ من الثانية إلى عدة بلايين من السنين كما في اليورانيوم ٢٣٨ حيث يقدر نصف العمر بـ ٤،٥ بليون سنة.

وعليه فإنه يُمكن تحديد العمر المطلق (t) لأي صخر أو معدن يحتوي على نظير مشع إذا ما عُرفت فترة نصف العمر (T½) لهذا النظير وكمية النظير التي كانت

موجودة في الصخر أو المعدن عند بداية تكونه (N) والكمية المتبقية منه (N_D) وذلك باستخدام المعادلة:

$$\text{عمر العينة الصخرية (t)} = \frac{1}{\lambda} \text{ لو}_e \left(\frac{No}{N} + ١ \right)$$

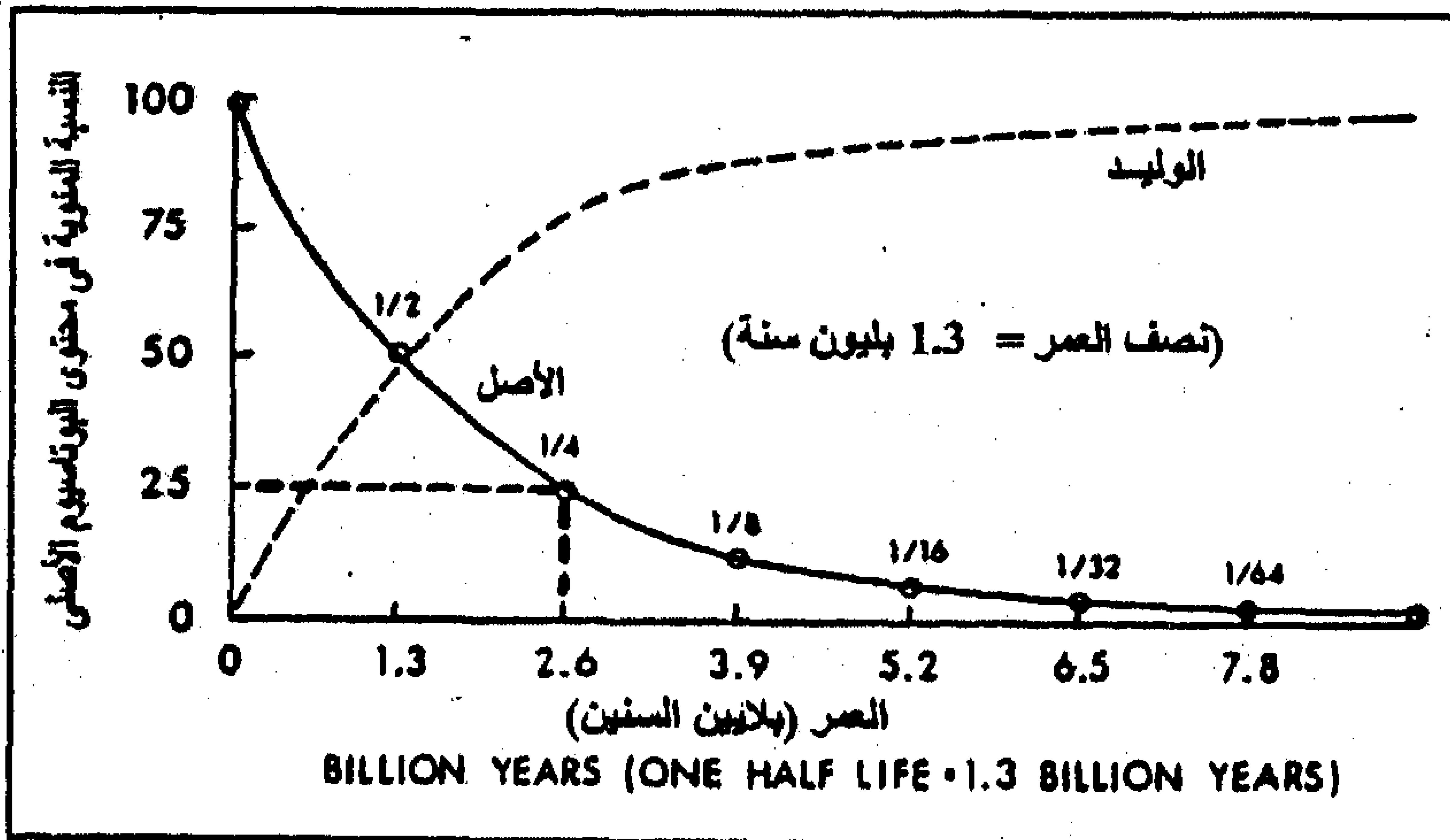
حيث (No) هي كمية العنصر الوليد وتساوي الفرق بين كمية العنصر الأول عند البداية No ناقصاً الكمية المتبقية منه N و λ هي ثابت الانحلال وتساوي ٠.٦٩٣ مقسومة على نصف العمر (T½)، ويختلف هذا الثابت من عنصر مشع لآخر.

ومن الطرق الإشعاعية المستخدمة في تحديد عمر العينات الصخرية طريقة البوتاسيوم/ الأرجون (K/Ar) حيث يتحول البوتاسيوم ٤٠ إلى أرجون ٤٠ مع فترة نصف عمر تُقدر بـ ١٣٠٠ مليون سنة كما في المعادلة:



$$(\text{Argon})\ ^{40}_{18}\text{Ar} \longleftarrow (\text{Potassium})\ ^{40}_{19}\text{K}$$

ويمكن بهذه الطريقة تحديد عمر صخور تتراوح أعمارها ما بين ٠،١ مليون سنة وأكثر من ٣ بليون سنة. وإذا ما افترضنا مثلاً أن نسبة التواجد بين البوتاسيوم ٤٠ والأرجون ٤٠ في عينة صخرية هي ١ : ٣ فإن عمر هذه العينة سيكون مساوياً لفترة نصف عمر أي ٢٦٠٠ مليون سنة باعتبار أن نصف العمر الواحدة تساوي ١٣٠٠ مليون سنة، والشكل ٢-١ يوضح العلاقة بين البوتاسيوم المشع (الأصل) والأرجون غير المشع (الوليد) وأعمار العينة الصخرية عند النسب المختلفة للبوتاسيوم والأرجون.



شكل ٢-١ : منحنى نصف العمر للبوتاسيوم ٤٠ وتحديد العمر المطلق.

وإضافة إلى ذلك هناك نظائر مشعة أخرى يمكن استخدامها في تعيين عمر العينات الصخرية وتشمل الكربون ١٤ واليورانيوم ٢٣٥ واليورانيوم ٢٣٨ والروبيديوم ٨٧ كما هو موضح بالجدول ٢-١.

جدول ٢-١: أكثر النظائر المشعة (الأصل والوليد) استخداماً
في تحديد عمر العينات الصخرية

النظير الأصل	الرمز	النظير الوليد	الرمز	نصف العمر (سنة)
بوتاسيوم ٤٠	K	أرجون ٤٠	Ar	١٠٣ بليون
روبيديوم ٨٧	Rp	سترونتيم ٨٧	Sr	٤٧ بليون
يورانيوم ٢٣٥	U	رصاص ٢٠٧	Pb	٠٠٧ بليون
يورانيوم ٢٣٨	U	رصاص ٢٠٦	Pb	٤٠٦ بليون
كربون ١٤	C	نيتروجين ١٤	N	٥٧٣٠

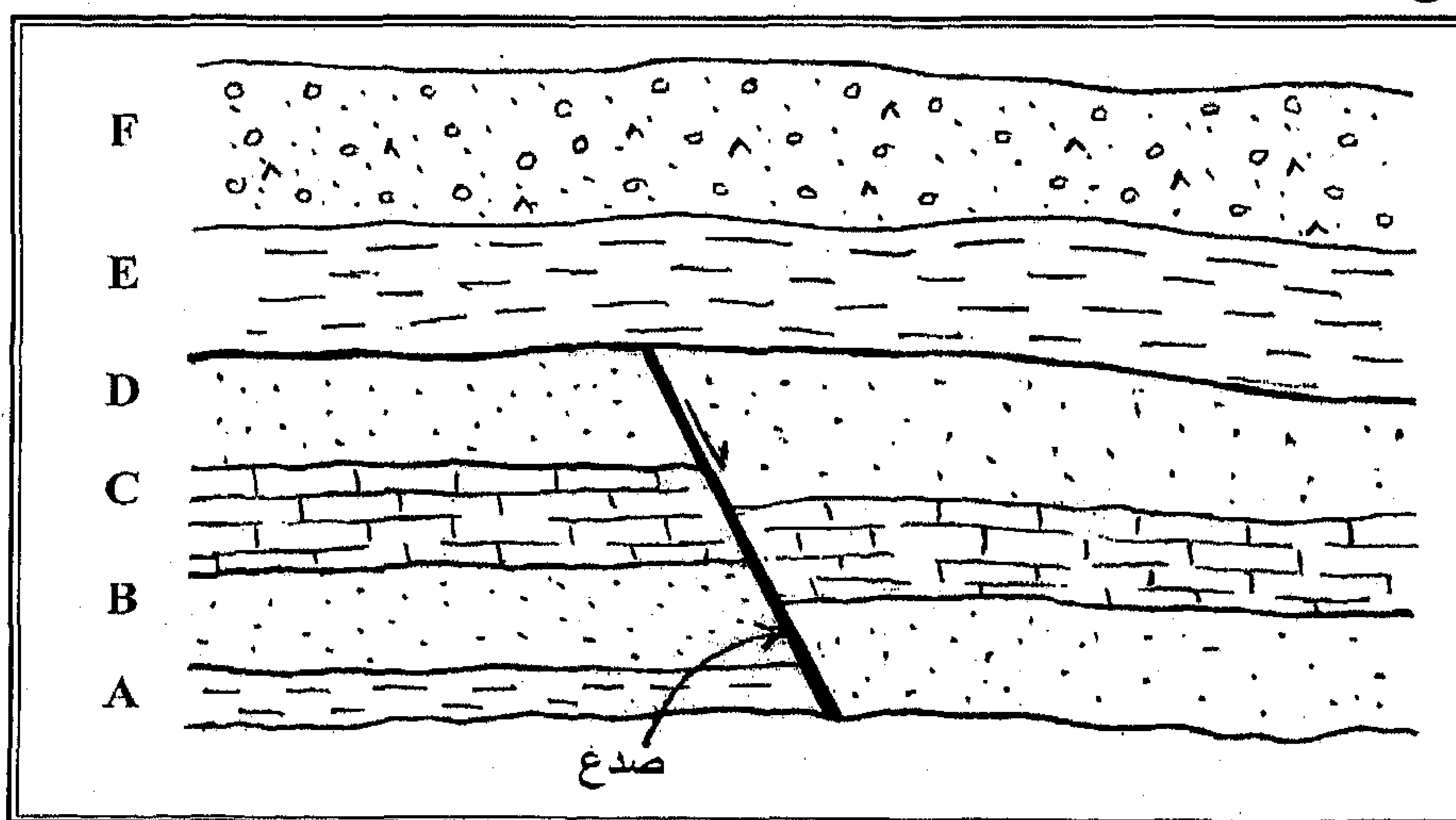
غير أن لكل هذه الاستخدامات أوجه قصورها – فمثلاً الكربون ١٤ ينحل بسرعة (نصف العمر ٥٧٣٠ سنة) وبالتالي يمكن استخدامه فقط للعينات التي لا يتجاوز عمرها ٧٠ ألف سنة وهو عمر جيولوجي قصير نسبياً، كذلك فإن اليورانيوم نادر الوجود في الصخور الشائعة، كما أن الروبيديوم ينحل ببطء شديد (نصف العمر ٤٧ بليون سنة) وهكذا.

وبالرغم من دقة الطرق الإشعاعية في تعيين العمر المطلق والتوسع في استخداماتها في الوقت الحاضر فإنها تواجه بعض المحاذير منها أن المعادن المشعة ليست موزعة بانتظام في صخور القشرة الأرضية وبالتالي لا توجد هذه العناصر في كل الصخور المراد قياس أعمارها، كذلك فإن نواتج الانحلال الإشعاعي قد تتعرض للنقص بفعل التجوية أو المياه الجوفية، كما أن المعادن المشعة ذاتها قد تتأثر بآليات التحول كالحرارة الشديدة والضغط، كذلك فإن عمر الحبيبات المكونة للصخر والمفترض وجود معادن مشعة بها قد لا تمثل الصخر الرسوبي الموجودة به حيث إن هذه الرواسب قد تمت تجويتها من صخور مختلفة ولذلك فإن الجيولوجيين يعتمدون على الصخور النارية القاطعة للطبقات الرسوبية أو

الصخور البركانية المتطابقة معها في تقدير العمر المطلق للصخور الرسوبية المصاحبة، حيث ستكون التدخلات النارية أحدث في العمر من الصخور الرسوبية التي تداخلت فيها، كما أن الصهارة أو اللابة lava ستكون أقدم في العمر من الصخر الرسوبي الذي تغطيه.

تحديد العمر النسبي:

لا يبين العمر النسبي relative age للصخور أو الأحداث الجيولوجية التقدير بالسنين بالدقة التي يحددها العمر المطلق، لكن تقدير العمر يكون منسوباً إلى معطيات أخرى ذات عُمر محدد، وفيما يتعلق بالصخور الرسوبية هناك قاعدة "تعاقب الطبقات principle of superposition والتي تنص على أنه في أي تتابع صخري تكون الطبقات الأقدم لأسفل والأحدث لأعلى ما لم تتعرض لتأثيرات تركيبية، ويكون الصخر أقدم من كل الصخور التي تعلوه ويكون أحدث من كل الطبقات الصخرية التي توجد تحته، كذلك فإن الأحداث التي تنتاب الصخور كالتصدعات والطيات التكتونية والطفوح البركانية وتدخلات اللابة وغيرها يمكن إدراك العمر النسبي لها، فإذا حدث أي منها فمعنى ذلك أنها ستكون الأحدث عمراً من الصخور التي اخترقتها أو استقرت فوقها، والشكل ٢-٢ يمكن أن يكون مثالاً على ذلك، فالطبقة A هي الأقدم عمراً من الطبقة B وهذه الأخيرة أقدم من الطبقتين اللتين تعلوهما C وD، أما الصدع فهو الأحدث عمراً حيث إنه قاطع لتلك الطبقات، كذلك فإن الطبقتين E وF هما الأحدث عمراً حيث تم ترسيبهما في زمن لاحق لجميع الطبقات الأخرى.



شكل ٢-٢: تحديد العمر النسبي للصخور

وبالإضافة إلى التتابع الصخري هناك التتابع الفوني faunal succession من خلال ما يُعرف بقانون التتابع الفوني. والفونة fauna هي مجموعة من الحيوانات (الحية أو الحفرية) توجد في مكان معين في زمن معين، والتتابع الفوني هو بالتالي تتابع من أشكال الحياة خلال فترة من التاريخ الجيولوجي توضح أن الحياة خلال فترة زمنية تختلف عنها في فترة سبقتها أو تلتها، وبمقارنة الفونات بعضها ببعض يستطيع الجيولوجي أن يتعرف على الرواسب التي لها العمر الجيولوجي نفسه، وأن يتوقع أيضاً وجود بقايا الكائنات الأكثر بدائية في الصخور الأقدم بينما الصخور الأحدث تزخر ببقايا تدُل على حياة أكثر تطوراً وتقدماً، وتُمثل المضاهاة correlation وسيلة أخرى في تحديد العمر النسبي للصخور، والمضاهاة هي عملية لبيان أن طبقات معينة تنتمي إلى طبقات أخرى أو تُكافئها من الناحية الإستراتجرافية وكذلك الربط بين الوحدات الطبقية المتباعدة جغرافياً ويمكن أن يكون ذلك على أساس الامتداد الجانبي للنوعية الصخرية في مناطق قريبة مكشوفة (مضاهاة صخرية) أو على أساس محتواها الحفري (مضاهاة حيوية) أو على أساس تشابه العمر (مضاهاة زمنية) أو على أساس البصمة المغناطيسية القديمة (مضاهاة فيزيائية) سواء أكان ذلك محلياً أو إقليمياً أو عالمياً.

وفي مجال البحث عن البترول وعمليات الاستكشاف يهتم الجيولوجي كثيراً بعمل هذه المضاهاة والربط بين الوحدات الصخرية المختلفة وذلك اعتماداً على المعلومات الجيولوجية الواردة إليه عادةً من الآبار التي تم حفرها، وعلى هذا الأساس يمكن له استنتاج البنيان الجيولوجي للطبقات الحاوية للبترول وكيفية امتدادها جانبياً ورأسياً وما قد يطرأ من تغيرات في سحنة الصخر الخازن وبالتالي يُمكن رسم خريطة لحدود التجمع البترولي بالمنطقة، وسوف نتناول ذلك بالتفصيل فيما بعد.

العمود الجيولوجي:

العمود الجيولوجي geologic column هو تمثيل بياني يوضح التتابع الكلي للصخور من أقدمها إلى أحدثها سواء كان ذلك بالنسبة للأرض كلها أو لمنطقة محددة، ويفيد هذا العمود أنه بالرجوع إليه يمكن للجيولوجي القادم إلى منطقة سبق تعيين عمودها الجيولوجي أن يتعرف على نوع الصخور هناك أو تلك التي يتوقع أن يجدها بمنطقة البحث، الأمر الذي سيسهل له مهمته في عمله الاستكشافي بالمنطقة، هذا ويُمكن أن

تُقسم التتابعات الكبيرة إلى وحدات أصغر تُستعمل على نِطاق محلي نظراً لأنها تقسيمات تعتمد على سمات صخرية وليست زمنية.

مقياس الزمن الجيولوجي:

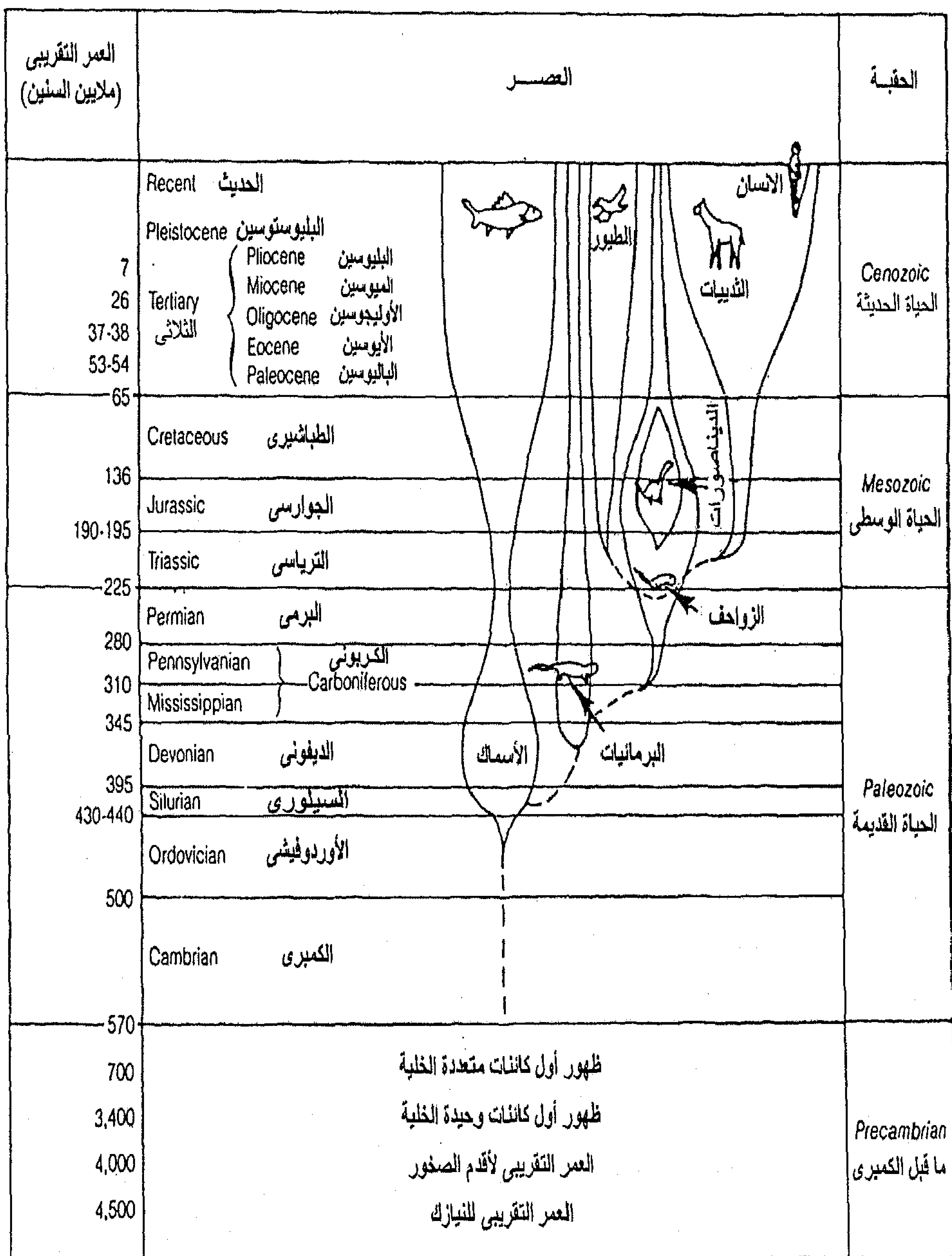
يتكون مقياس الزمن الجيولوجي geologic time scale من سجل لتتابع الأحقاب والعصور الجيولوجية مرتبةً ترتيباً زمنياً ومُبين أمام كلٍ منها العمر المطلق مُقدراً بملايين السنين (شكل ٢-٣) وذلك باستخدام أي من الطرق التي سبق شرحها في تحديد العمر، وهو يشبه كثيراً العمود الجيولوجي ولكنه يتضمن المراحل الزمنية الكبيرة وذلك انطلاقاً من قاعدة تعاقب الطبقات وتحديد العمر المطلق والنسبي لتلك المراحل.

ويُقسم الزمن الجيولوجي إلى دهرين eons عظيمين: الدهر الأول وهو الأقدم ويُعرف بدهر ما قبل الكمبري Precambrian أو دهر الحياة المستترة Cryptozoic eon والدهر الثاني وهو الأحدث ويسمى الفانيروزوي Phanerozoic أي دهر الحياة الظاهرة – ويُقسم الفانيروزوي بدوره إلى وحدات زمنية كبيرة هي الأحقاب eras، وتُقسم كل حقبة إلى وحدات زمنية أصغر تُسمى العصر period أي فترة من الزمن الجيولوجي، ويُطلق على الصخور التي تكونت خلال هذه الفترة الزمنية الحين epoch والتي تنقسم بدورها إلى أقسام أصغر تُعرف بالعهود ages، ويبين الشكل ٢-٣ مقياس الزمن الجيولوجي وتُمثل الأعداد العمر بملايين السنين قبل الآن، بالإضافة إلى تطور الحياة على مدى تاريخ الأرض.

تاريخ الأرض والأزمنة البترولية:

عرفنا في السابق أن عمر الأرض يُقدر بنحو ٤،٥ بليون سنة وأن دهر ما قبل الكمبري لا توجد به شواهد على الحياة في الفترة الزمنية الأولى منه، ويُحتمل أن تكون أول حياة في هذا الدهر لكائنات طحالبية تسبح في المحيطات ويرجع عمرها إلى نحو ٣٠٠٠ مليون سنة، كما أن السجل الحفري خلال الجزء المتأخر من هذا الدهر كان شحيحاً ولكنه يشير إلى وجود أشكال بسيطة من الحيوانات والنباتات التي تواجدت في مياه المحيطات، وقد جعلت نُدرة هذه الكائنات دهر ما قبل الكمبري فقيراً للغاية بالمادة العضوية وبالتالي كادت أن تنفد فيه كليةً الصخور المصدرية للبترول حيث إن كثيراً من رواسب هذا الدهر

قد طُمرت ودُفنت في أغوار سحيقة حيث تعرضت إلى عمليات تحول بالغة لتصبح صخوراً متحولة غير مؤهلة لكي تكون خزانات صالحة للتجمعات البترولية.



شكل ٢-٣: مقياس الزمن الجيولوجي.

إن أول تسجيل للحفريات كان في حقبة الباليزوي (الحياة القديمة Paleozoic era) منذ حوالي ٦٠٠ مليون سنة حيث كانت الحياة زاخرة بالعديد من النباتات والحيوانات مثل الطحالب والفطريات والمحاريات والإسفنجيات والمرجانيات التي عاشت بالمحيطات ومازالت تعيش حتى يومنا هذا، وفي العصر الأردوفيشي Ordovician period من تلك الحقبة ظهرت الأسماك كأول فقاريات. وفي العصر السيلوري Silurian الذي تلاه ظهرت النباتات والحيوانات التي عاشت على الأرض، وفي العصر الكربوني Carboniferous كانت هناك مساحات شاسعة من الأرض مغطاة بالمستنقعات وبها نباتات بدائية تطورت إلى أن أصبحت أشجاراً كبيرة، كما زخرت الحياة بالحيوانات البرمائية amphibians والتي تجمع بين البر والماء، ومن رواسب المستنقعات تكونت خامات الفحم، وفي العصر البرمي Permian period وهو آخر عصور الحياة القديمة والذي استمر حوالي ٥٠ مليون سنة ساد الحياة مناخ جاف للغاية ساعد على ظهور نوع جديد من الحيوانات وهي الزواحف reptiles.

أما الحقبة الوسطى (الميزوزوي Mesozoic era) والتي بدأت منذ حوالي ٢٢٥ مليون سنة وسميت كذلك حيث إنها تمثل الفترة الانتقالية من النباتات والحيوانات البدائية التي ظهرت في حقبة الحياة القديمة إلى الأشكال الأكثر تطوراً في حقبة الحياة الحديثة، ففي الحقبة الوسطى حدث تنوع وانتشار غير مسبوق للحيوانات البرية وبخاصة الزواحف ومنها الديناصورات dinosaurs وذلك لأكثر من ١٥٠ مليون سنة من تاريخ الأرض، وبلغت الديناصورات أحجاماً وأوزاناً كبيرة ووصلت أطوالها ما بين ١٠-١٥ متراً (٣٠ – ٥٠ قدماً) كما أن أغلب هذه الديناصورات من أكلة النباتات إلا أن بعضاً منها كان من أكلة اللحوم، كذلك فقد شهدت هذه الفترة عودة بعض الزواحف إلى الماء بل كان لبعضها أجنحة بالغة الطول ١٥ متراً (٥٠ قدماً) وكانت تطير في الهواء.

وخلال العصر الجوراسي Jurassic period – وهو منتصف الحقبة الوسطى – ظهرت الثدييات mammals والطيور birds لكن الزواحف سادت أيضاً خلال بقية الحقبة المتوسطة، غير أنه وفي نهاية الحقبة (حوالي ٧٠ مليون سنة) حدث إنقراض مفاجئ وغير مفسر لجميع هذة الديناصورات والتي عاشت لأكثر من ١٠٠ مليون سنة وبلغت أشكالاً وأحجاماً ضخمة وأنواعاً كثيرة وغزت بيئات مختلفة وعاشت وصمدت فيها مما

دفع الكثير من علماء الجيولوجيا والبيولوجيا لمحاولة تفسير هذا الحدث المُحير، ويُقال من بين تلك التفسيرات أن نيزكاً meteorite عظيماً قد اصطدم بالأرض في ذلك الحين وأدى الإشعاع والغبار الذري الناتج عن ذلك إلى هلاك هذه الديناصورات مرةً واحدةً.

وفي حقبة السينوزوي (حقبة الحياة الحديثة Cenozoic era) حوالي ٦٣ مليون سنة وهو عمر قصير نسبياً إذا ما قورن بالأحقاب التي سبقته، وقد سُميت هذه الحقبة بالحياة الحديثة نظراً للكم الهائل والمتنوع من النباتات والحيوانات التي تطورت خلالها، حيث انتعشت وتكاثرت الثدييات كما ازدهرت النباتات والأشجار في كل الأنحاء والتي أصبحت مصدراً رئيساً لتلك الثدييات.

وفي نهاية هذه الحقبة وفي عصر البليستوسين Pleistocene period أو كما يُسمى عصر الجليد Ice Age ساد الحياة طقس شديد البرودة وغطت الثلوج مساحات كبيرة من اليابسة (حوالي ثُلُث مساحة الأرض) وتميز هذا العصر بأربع فترات ثلجية عظمى تخللتها ثلاث فترات دافئة حدث خلالها انصهار للجليد مما ساعد على انقراض الكثير من النباتات والحيوانات التي كانت تعيش آنذاك، وربما يكون من الأحداث المهمة أيضاً في عصر البليستوسين هو ظهور أول إنسان منذ ٦٠٠ ألف سنة تقريباً.

وعلي الرغم من أن الحد الفاصل بين البليستوسين والعصر الحديث Recent ليس مؤكداً بالضبط لكنه يُعتبر عادةً على أنه الفترة الزمنية التي تراجع عندها الجليد عن أوروبا وأمريكا الشمالية وكان ذلك منذ ١٢ – ١٥ ألف سنة مضت وكانت الحياة في حقبة الحياة الحديثة تتميز منذ فجر بدايتها بنباتات وحيوانات تشبه كثيراً من نواحي متعددة مثيلاتها الحالية، وزادت أهمية الثدييات إلى درجة كبيرة، وكانت النباتات حديثة في مظهرها وساعدت الغابات والسهول العشبية على تشكيل ظروف بيئية مناسبة لانتشار الثدييات.

وبالنسبة لاستكشاف البترول فقد أظهرت نتائج البحث أن البترول متواجد على مدى الأزمنة الجيولوجية المختلفة، بيد أن هذه الأزمنة قد تتفاوت في مدى ثرائها بهذه الثروة الطبيعية، وعلى سبيل المثال فإن صخور ما قبل الكمبري والكمبري والترياسي حقق إنتاجها من البترول أقل من ١٪ من الإجمالي العالمي، كذلك فإن صخور

البليستوسين والحديث كان إنتاجها من الزيت الخام ضئيلاً للغاية، وعلى عكس ذلك فإن رواسب الزمن الثلاثي Tertiary يقدر حجم الاحتياطي البترولي بها ما يزيد عن ٥٧٪ من إجمالي الاحتياطي العالمي، أما صخور الطباشيري والباليزوي فقد قُدر محتواها من الخام على الترتيب بنحو ٢٨٪ و ١٤٪ من الإجمالي العالمي.

هذا ويُفسر ندرة البترول المستخرج من رواسب الزمن الرباعي Quaternary بقلة عدد الآبار المحفورة في هذه الرواسب ومحدودية أعمال الاستكشاف وربما أيضاً بسبب عدم توافر فترة زمنية كافية لتمكين البترول من التجمع بالخزانات الجوفية وعدم وجود صخور غطاء كافية فوق المصايد التحتسطحية، كما أن الطبيعة غير البحرية لرواسب هذا الزمن ربما لعبت دوراً في ذلك.

أما الأسباب التي ترجع إلى وفرة التجمعات البترولية في صخور الزمن الثلاثي فيمكن تلخيصها فيما يلي:

- يحتوي الزمن الثلاثي على تتابعات سميكة من الصخور الرسوبية غير المتحولة وتتوافر بها المصايد البترولية والصخور الخزانية بالإضافة إلى صخور الغطاء غير المنفذة.
- صخور الزمن الثلاثي قد أتت من صخور أقدم تفتتت وتجوت ثم ترسبت من جديد مما أكسبها سمكاً هائلاً.
- لم تتعرض صخور الزمن الثلاثي لعمليات تجوية وتعرية كبيرة، لذا بقيت واحتفظت بخصائصها الخزانية التي أتاحت الفرصة للتجمعات البترولية بها.

الفصل الثالث
المعادن والصخور

تتكون القشرة الأرضية من المعادن والصخور، ويعتبر المعدن وحدة تركيب الصخر بمعنى أن هذا الصخر يتركب من معدن أو أكثر، ومع أن العناصر التي تدخل في تكوين القشرة الأرضية عديدة فإننا نجد أن نحو تسعة من هذه العناصر فقط تكون أكثر من ٩٩٪من محتويات القشرة الأرضية كذلك فإن عدد الصخور والمعادن محدود أيضاً، وبالنسبة للعمل الاستكشافي يمكن التعرف عليها من خلال اختبارات قد تكون بسيطة أو أكثر تفصيلية باستخدام التقنيات المتطورة كالمجهر الإلكتروني الماسح أو بيانات تسجيلات الآبار، ونظراً لأهمية هذا الأمر فإن الجيولوجي أو مهندس البترول الذي يعمل في مجال الاستكشاف عليه أن يكون قادراً على التمييز بين أنواع الصخور والمعادن الشائعة سواء كان ذلك أثناء ارتياده لمناطق البحث أو موجوداً بمواقع الآبار التي يجري حفرها بحثاً عن الطبقات الحاملة للبترول أو حتى كان متواجداً بمكتبه.

المعادن وخصائصها الطبيعية:

يعرف المعدن mineral بأنه مادة طبيعية غير عضوية له غالباً تركيب كيميائي خاص وصفات مميزة، فمعدن الكالسيت مثلاً يتكون من كربونات الكالسيوم وتركيبه الكيميائي $CaCO_3$ ، كذلك فإن معدن الكوارتز (المرو) يتكون من ثاني أكسيد السيليكونSiO_2 وقس على ذلك،وتتواجد المعادن في الطبيعة على هيئة بلورات أو على شكل حبيبات دقيقة داخل الصخر، وعند التعامل مع المعادن فإن أول ما ينبغي للجيولوجي هو أن يتعلم كيف يختبر عينة من المعدن حتى يتعرف عليها بدقة خاصة وأن كثيراً من هذه الاختبارات لا يحتاج إلى أجهزة معملية غالية الثمن، بل يعتمد على فحوصات بسيطة ترتبط بالصفات الفيزيائية لتلك المعادن والتي تشمل اللون والبريق والشكل والصلادة والتشقق والوزن النوعي والشكل البلوري وغير ذلك من الصفات، وفيما يلي سرد مختصر لتلك الصفات.

الصفات الطبيعية للمعادن:

اللونcolour: تتميز بعض المعادن بألوانها الطبيعية الثابتة كمعدني الذهب والكبريت بلونها الأصفر، كما أن معدن الجالينا PbS يتميز باللون الرصاصي الفولاذي، غير أنه في أحوال قليلة فإن المعدن غالبا ما يكون مختلطا بالشوائب فمعدن المرو يكون شفافا إذا كان نقيا ولكنه قد يميل إلى اللون الرمادي أو الوردي مما يغير من لونه الأصلي.

البريق lustre: وهو الخاصية التي يتأثر بها المعدن عند سقوط الضوء عليه وانعكاسه على سطح المعدن، فهناك معدن له بريق فلزي مثل معدن الذهب والجالينا وآخر ليس له ذلك البريق والذي قد يكون زجاجيا مثل معدن المرو والهاليت أو صمغيا مثل الكبريت أو ألماسيا مثل الألماس وغير ذلك.

الصلادة hardness: هذه الخاصية ذات أهمية كبيرة في تمييز المعادن، والمعادن الصلدة تخدش المعادن الأقل منها صلادة ويمكن قياس صلادة المعدن بخدشه بأحد المعادن المعروفة صلادتها فإذا خدش يكون أقل صلادة من المعدن الأول، ولقياس درجة صلادة المعدن قدم موه Moh مقياسا من عشر درجات مرتبة ترتيبا تصاعديا حيث يكون المعدن رقم (١) في الترتيب هو أقل المعادن صلادة وهو التلك talc والمعدن رقم (١٠) أكثرها صلادة وهو معدن الألماس diamond وذلك على النحو التالي:

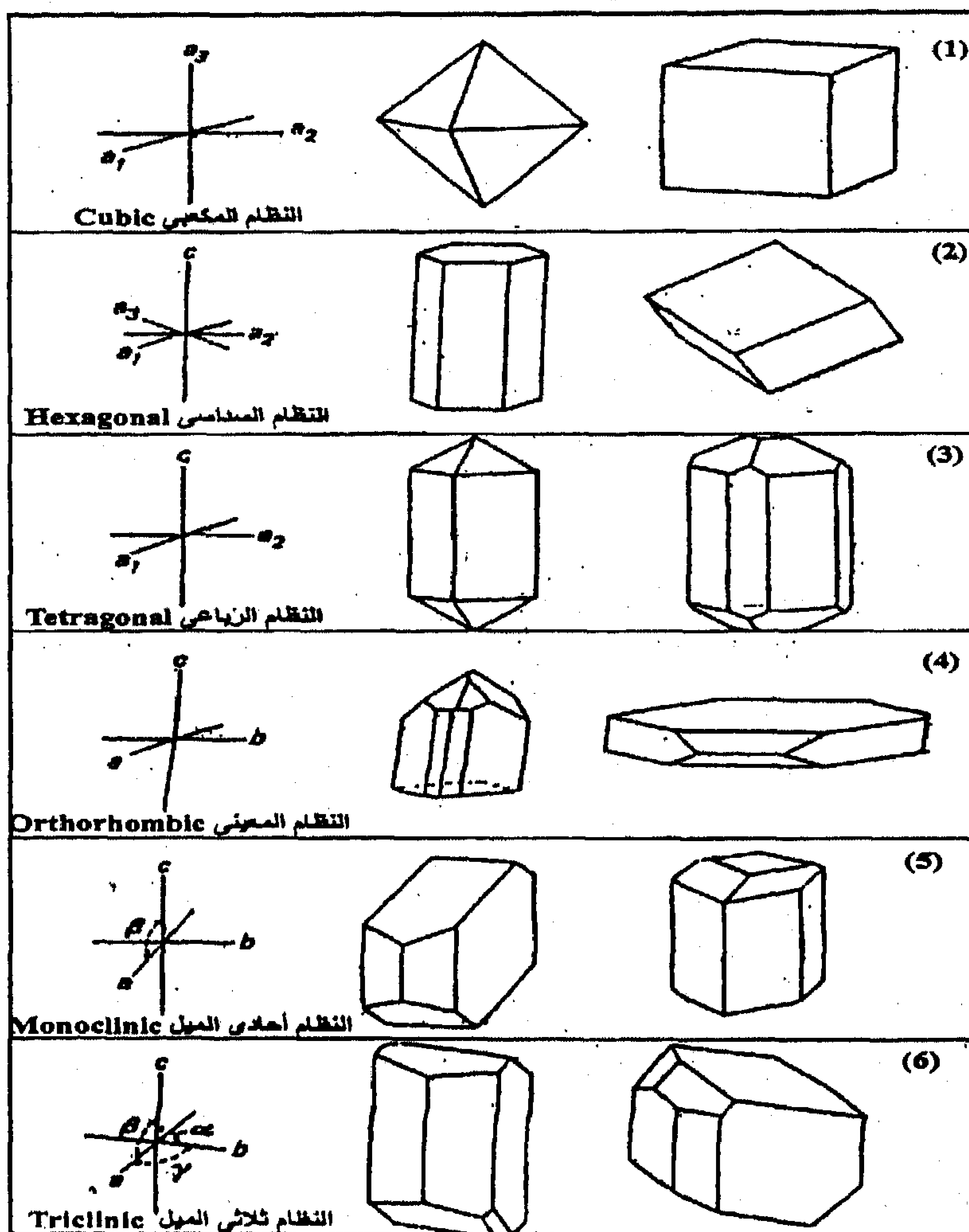
١- التلك.	٦- الأرثوكلاز (الفلسبار).
٢- الجبس.	٧- الكوارتز(المرو).
٣- الكالسيت.	٨- التوباز.
٤- الفلوريت.	٩- الكوراندوم (الياقوت).
٥- الهيماتيت.	١٠- الألماس.

وقد وجد أن درجة صلادة ظفر الإنسان تقدر بنحو ٢،٥ وبالتالي فهو يخدش كلا من معدني التلك والجبس ولكن لا يخدش الكالسيت، كما لوحظ أن صلادة نصل السكين أو المطواة مابين ٦-٥ درجات والزجاج ٧ درجات.

التشقق cleavage : لا تتواجد هذه الخاصية في كل المعادن ولكنها عرفت في بعضها مثل معدن الميكا الذي يتشقق إلى صفائح رقيقة للغاية في اتجاه واحد، وهذا التشقق ناتج من أن ذرات المعدن ضعيفة التماسك في هذا الاتجاه، وأن بعض المعادن مثل الهورنبلند يتشقق في مستويين متقاطعين، كما أن بعض المعادن لا يتشقق مثل معدن المرو.

الشكل البلوري crystal form: قد توجد المعادن في الطبيعة على هيئة بلورات ذات شكل هندسي خاص ويتبع نظاما بلوريا معينا،وتختلف البلورات في الحجم فبعضها دقيق

لا يكاد يرى بالعين المجردة وبعضها متوسط الحجم يمكن تمييزه ورؤيته، وبعضها يبلغ حجما كبيرا يسهل التعرف عليه، وينتج تبلور المعادن من ترتيب الذرات التي تتركب منها، أما المعادن غير المتبلورة فإن ذراتها تكون مبعثرة وليس لها شكل هندسي خاص، وفي بلورة ملح الطعام halite مثلا والتي تتركب من عنصري الصوديوم والكلور NaCl يتخذ هذان العنصران أوضاعا هندسية ثابتة داخل المعدن حسب نظام بلوري محدد يعرف في هذه الحالة بالنظام المكعبي والذي يتميز بثلاثة محاور للتماثل متعامدة ومتساوية، كما أن المرو أو الكالسيت تدخل بلوراتها ضمن النظام السداسي ذي محاور التماثل الأربعة ثلاث منها متساوية وأفقية وواحد عمودي عليها وهكذا (شكل ٣-١).



شكل ٣-١: النظم البلورية المختلفة

وجدير بالذكر أن المعادن التي توجد متبلورة في الطبيعة تنتمي إلى ستة نظم بلورية يتميز كل منها عن الآخر بعدد ثابت من المحاور والمستويات البلورية، وهناك النظام المكعبي والرباعي والسداسي والمعيني وأحادي الميل وثلاثي الميل (شكل ٣-١)، وللمزيد من التفاصيل يمكن الرجوع إلى كتب علم البلورات والمعادن.

المكسر fracture: تنكسر المعادن إذا تعرضت لإجهاد يفوق حد اللدونة والمرونة، ولمكسر هذه المعادن أهمية في تمييزها عن بعضها الآخر، وذلك أن بعضها عند كسره يكون سطحه ناعما ومنظما أو خشنا وغير منتظم مثل الصوان والمرو.

المخدش streak: وهو لون المسحوق الناعم للمعدن، فقد تكون بعض المعادن ذات لون واحد ولكن عند خدشها تعطي ألوانا متباينة فمثلا معادن أكاسيد الحديد المختلفة نجد أن أكسيد الحديد العادي (الهيماتيت) يكون لون مسحوقه أحمر، أما أكسيد الحديد المائي (الليمونيت) فيكون لون مسحوقه بنيا، وأكسيد الحديد المغناطيسي (الماجنتيت) لون مسحوقه رماديا.

الوزن النوعي specific gravity: يعرف الوزن النوعي (أو الكثافة النوعية) بأنه النسبة بين وزن المعدن في الهواء والفرق بين هذا الوزن ووزنه في الماء، وتعتبر هذه الخاصية من بين الخواص المهمة في الكشف عن المعادن، فقد يتشابه أكثر من معدن في اللون والبريق والشكل لكنهما يختلفان في وزنهما النوعي إذا ما تم فحصهما معمليا، فمثلا بالرغم من أن الألماس والجرافيت كلاهما يتكون من الكربون إلا أن الألماس أثقل بكثير لأن ذراته مرصوصة رصاً محكماً، كما أن معادن الحديد والنحاس والنيكل تشتهر بكثافتها النوعية العالية نسبياً، وتتراوح ما بين ٥ في معدن البيريت FeS_2 و٦-٧ في معدن الجالينا PbS.

وبالإضافة إلى الصفات الفيزيائية الآنفة الذكر هناك أيضاً صفات أخرى يمكن عن طريقها التعرف على المعادن وذلك عن طريق مذاقها ورائحتها وتفاعلاتها مع الأحماض، فمثلا الملح الصخري halite يتميز بمذاقه المالح، كما أن معدن البيريت إذا سخن تصاعدت منه رائحة الكبريت، كما أن بعض المعادن خاصة الطينية منها تلتصق باللسان عند لمسها به، كما أن معدن الكالسيت يتفاعل مع حامض الهيدروكلوريك البارد ويتصاعد غاز ثاني أكسيد الكربون بينما معدن الدولوميت لا يتفاعل مع نفس الحامض إلا إذا كان ساخنا وهكذا.

ويلخص الجدول ٣-١ بعض الخصائص التي يمكن بواسطتها التفرقة بين معدن وآخر من المعادن السالفة الذكر:

جدول ٣-١: الخصائص الطبيعية لعدد من المعادن الشائعة.

المعدن		الصلادة	الكثافة النوعية	البريق	النظام البلوري
المرو (الكوارتز)		٧	٣	زجاجي	السداسي
الكالسيت		٣	٢،٧١	زجاجي- كامد	السداسي
الدولوميت		٤-٣،٥	٢،٨٧	زجاجي- صدفي	السداسي
الميكا	البيضاء	٢،٥-٢	٢،٦	لؤلؤي- زجاجي	أحادي الميل
	السوداء	٣-٢،٥	٣،١-٢،٨	لؤلؤي- زجاجي	
الهاليت		٢،٥-٢	٢،١	زجاجي	المكعبي
الجبس		٢	٢،٣	زجاجي- لؤلؤي	أحادي الميل
الأنهيدريت		٣،٥-٣	٢،٩	زجاجي- حريري	المعيني
البيريت		٦،٥-٦	٥	معدني	المكعبي
الجالينا		٢،٥	٧،٥	معدني	المكعبي
الباريت		٣،٥-٣	٤،٥	زجاجي	المعيني

ويلاحظ من هذا الجدول أن كل معدن يتمتع على الأقل بخاصية أو أكثر تميزه عن المعادن الأخرى، وعلى سبيل المثال فإن معدن المرو (الكوارتز) هو من أكثر المعادن صلادة ولا يمكن خدشه حتى بالسكين، أما الكالسيت فهو لين نسبياً ويسهل خدشه بالسكين، كما أن معدن الجالينا هو أعلاها من حيث الكثافة النوعية (٧،٥) وله صلادة قليلة (٢،٥) وهكذا.

وصف لبعض المعادن ذات الأهمية الخاصة:

لسنا هنا بصدد تقديم وصف شامل للمعادن الموجودة في الطبيعة ولكن الشرح سوف يقتصر على بعض المعادن الشائعة والتي تصادفنا أثناء العمل الاستكشافي للبحث عن البترول وذلك إما عن طريق المشاهدات الحقلية أو من الفتات الصخري rock cuttings أو العينات اللبية cores التي تستخرج من الآبار والتي يتم فحصها

للتعرف على مكوناتها المختلفة، ذلك أن التعرف على هذه المعادن وخصائصها المختلفة سوف يساعد كثيرا على دراسة الخزانات الجوفية والاهتداء إلى بيئتها الترسيبية كما سنرى فيما بعد.

المرو (الكوارتز) quartz: وهو معدن شائع يتركب من ثاني أكسيد السيليكون SiO_2وهو أبيض اللون غالباً وقد يكون مختلطا بشوائب تعمل على تغيير لونه إلى الرمادي أو الوردي أو الأصفر ويتبلور المعدن في مجموعة السداسي ، كما يعتبر معدنا ثابتا لا يتحلل وله بريق زجاجي ودرجة صلادته ٧ وكثافته النوعية ٢،٧ ويتكون منه الرمل الذي تنقله الرياح ويترسب في المناطق المختلفة (راجع شكل ٣-٢أ).

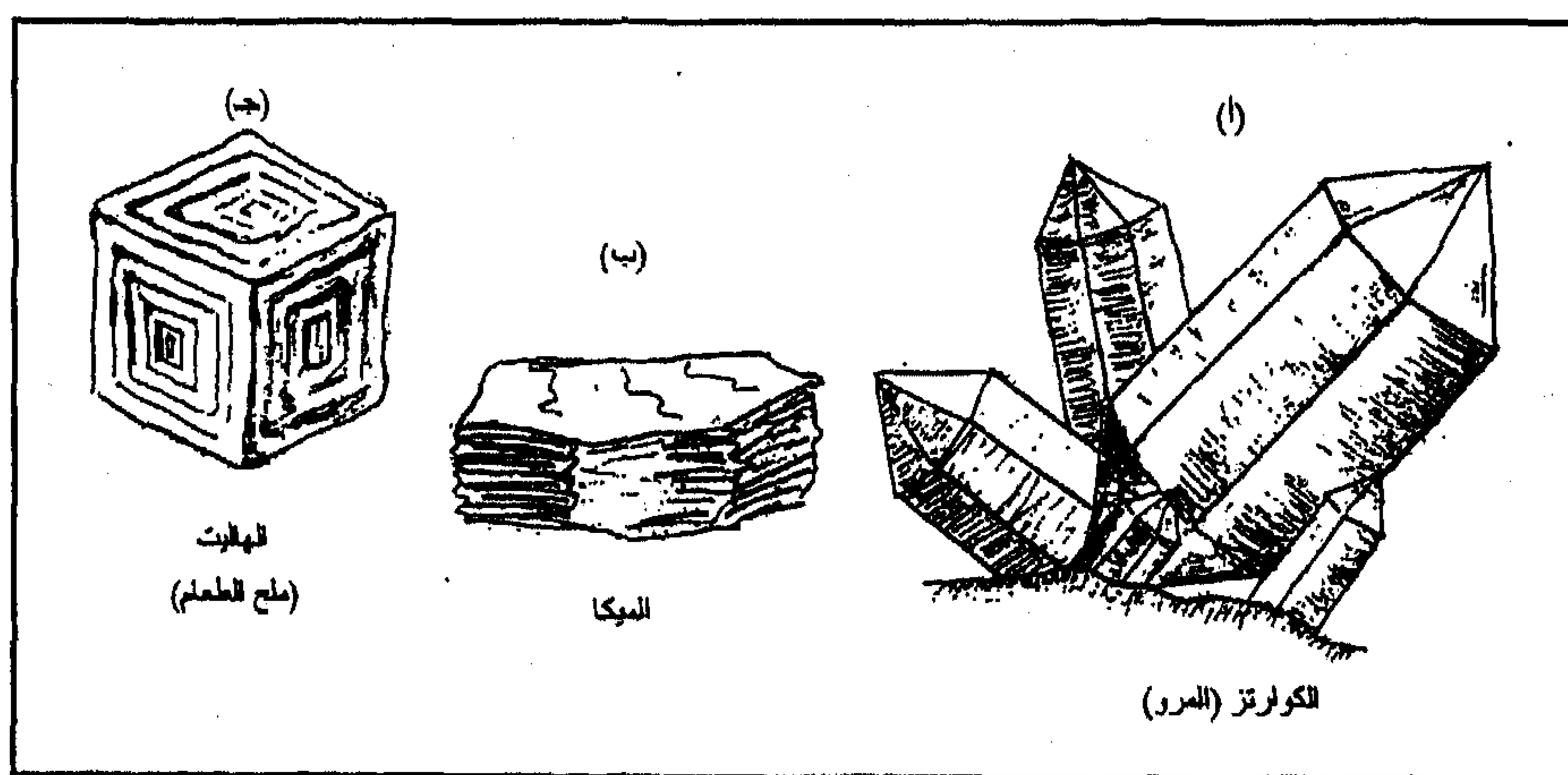
الكالسيت calcite: وهو معدن شائع أيضاً كالمرو ويتركب من كربونات الكالسيوم $CaCO_3$ ويتبلور في مجموعة السداسي وله تشقق واضح حيث ينفصل إلى أجزاء صغيرة وتبلغ صلادته ٣ وكثافته النوعية ٢.٦ ويوجد عادة شفافا لا لون له وأحيانا ما يكون أبيض اللون أو رماديا،وهذا المعدن أهم مركبات الحجر الجيري ويمكن الكشف عنه بسهولة بإضافة نقطة من حامض الهيدروكلوريك فيتفاعل معه ويحدث فوران ويتصاعد غاز ثاني أكسيد الكربون، وأغلب الأصداف البحرية تتكون من هذا المعدن.

الدولوميت dolomite: وهو معدن يشبه الكالسيت ويشترك في تركيبه عنصرا المغنسيوم والكالسيوم $CaMg(CO_3)_2$ وهو ناتج من إحلال المغنسيوم جزئيا محل الكالسيوم وذلك بفعل المياه أو السوائل الغنية بعنصر المغنسيوم عند مرورها بمعدن الكالسيت وتسمي هذه العملية بالدلمتة dolomitisation ويتبلور معدن الدولوميت في مجموعة السداسي وله تشقق واضح مثل معدن الكالسيت ولونه أبيض أوأصفر أو بني وله بريق زجاجي أو صدفي وتبلغ صلادته ٣،٥-٤ وكثافته النوعية ٢،٩ ولا يتفاعل مع حامض الهيدروكلوريك البارد مما يسهل تمييزه عن معدن الكالسيت.

الميكا mica: يوجد نوعان في الطبيعة من هذا المعدن، أحدهما يعرف بالميكا البيضاء والآخر بالميكا السوداء، فالميكا البيضاء (المسكوفيت) تتركب من سليكات الألومنيوم المائية مع البوتاسيوم $KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$ بينما تتركب الميكا السوداء (البيوتيت) من سيليكات الألومنيوم المائية والمغنسيوم والحديد $K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$، ويتبلور المسكوفيت

في مجموعة أحادي الميل وله تشقق واضح مواز لقاعدة البلورة وصلادته من ٢-٢،٥ وكثافته النوعية ٢،٦، ويوجد هذا المعدن في صخور الجرانيت وهو معدن ثابت لا يتحلل لذا يكثر وجوده في الرمل، أما معدن البيوتيت فهو بني أو أسود اللون وهو ذو تشقق واضح (شكل ٣-٢) وصلادته تتراوح بين ٢،٥-٣ وكثافته النوعية ٢،٨-٣،١ ويختلف عن المسكوفيت أنه غير ثابت وسرعان ما يتحلل ويتحول إلى معدن الكلوريت الأخضر (راجع شكل ٣-٢ب).

الهاليت rock salt or halite: يتركب هذا المعدن من كلوريد الصوديوم NaCl ويتبلور في مجموعة المكعب ولونه أبيض أو شفاف وأحياناً ما يكون مصفراً أو محمراً نظراً لوجود بعض العناصر الأخرى الملونة وهو يذوب في الماء وله تشقق واضح وصلادته ٢ وكثافته النوعية ٢،١ وقد ترسب هذا المعدن عن طريق تبخر ماء البحر، وهو شائع في الرواسب الملحية القديمة والتي تعرف بالمتبخرات evaporites (راجع شكل ٣-٢ج).



شكل ٣-٢: مثال للشكل البلوري لعدد من المعادن.

الجبس gypsum: يتركب هذا المعدن من كبريتات الكالسيوم المائية $CaSO_4.2H_2O$ ويوجد عادة متبلوراً في مجموعة أحادي الميل ولكن أحيانا بشكل كتلي أو بلورات ليفية وله بريق الحرير وتبلغ صلادته ١-١،٥ وكثافته النوعية ٢،٣ وهو في العادة أبيض اللون أو شفاف ولكن قد يكون مختلطا بالشوائب التي تؤثر على لونه.

الأنهيدريت anhydrite: وهو الجبس اللامائي ويتركب من كبريتات الكالسيوم $CaSO_4$ وهو متبلور في مجموعة المعين وله تشقق واضح وصلادته ٣-٣،٥ وكثافته النوعية أعلى بكثير من الجبس حيث تبلغ ٢،٩ ويوجد هذا المعدن بشكل شائع في الصخور الرسوبية ضمن رواسب المتبخرات.

البيريت pyrite: يتركب المعدن كيمياتيا من كبريتيد الحديد FeS_2 وهو ذو لون أصفر نحاسي وله بريق معدني ويتبلور في مجموعة المكعب ولا يوجد به أي تشقق معروف وتبلغ صلادته ٦-٦،٥ وكثافته النوعية نحو ٥ ولون مسحوقه أسود مائل إلى الخضرة، والبيريت معدن غير ثابت وقد يتحول إلى أكسيد الحديد المائي، كما أنه يوجد في كثير من الصخور النارية والمتحولة والرسوبية، كما يوجد على هيئة حبيبات في رمال الأنهار.

الجالينا galena: يتركب هذا المعدن من كبريتيد الرصاص PbS ولونه رصاصي وبريقه معدني وله تشقق واضح، ويتبلور في مجموعة المكعب وأحيانا يكون على هيئة كتل، وتبلغ صلادته ٢،٥ وكثافته النوعية ٧،٥ ويعتبر المصدر الرئيس لخام الرصاص.

الباريت baryte: يتركب هذا المعدن من كبريتات الباريوم $BaSO_4$ وهو إما شفاف أو أبيض اللون وبريقه زجاجي وبه تشقق واضح، ويتبلور في مجموعة المعين كما توجد منه أنواع غير متبلورة، وتبلغ صلادته ٣-٣،٥ وكثافته النوعية ٤،٥ ويوجد هذا المعدن عادة مع معدن الكالسيت، كما أنه يستخدم في حفر الآبار حيث تتم إضافته لمحلول الطفل لزيادة كثافته ورفع كفاءته.

الصخور وتصنيفها:

يعرف الصخر بأنه تجمع صلب متماسك وتكون طبيعياً من معدن أو أكثر مثل الجرانيت والرخام أو من تجمع من حبيبات من صخور أخرى مثل الحجر الرملي، ويعتبر الفحم والزجاج الطبيعي صخوراً استثناء من هذا التعريف، والصخور هي الوحدات المكونة للقشرة الأرضية وتصنف من حيث تكوينها ونشأتها إلى ثلاثة أنواع هي الصخور النارية والرسوبية والمتحولة وذلك حسب التصنيف الذي قدمه العالم الألماني روزنبش (Rosenbusch) عام ١٨٨٢، وفيما يلي وصف لكل نوع من تلك الصخور.

الصخور النارية وأمثلة منها:

الصخور النارية igneous rocks: هي التي تكونت نتيجة لتصلب وتبلور المادة المنصهرة الموجودة في باطن الأرض التي تعرف بالصهارة magma وقد يحدث ذلك بعيدا عن سطح الأرض وعندئذ تكون بلورات هذه الصخور كبيرة في الحجم، أو قريبا من سطح الأرض مما يجعل حجم البلورات متوسطا، أو فوق سطح الأرض وعندئذ تكون البلورات صغيرة ودقيقة في الحجم، وتعرف المادة آنذاك باللابة lava، وبسبب الاختلاف في حجم البلورات يمكننا أن نتعرف على الظروف التي تكونت فيها هذه الصخور بمجرد رؤيتها وفحص بلوراتها، وتجدر الإشارة بأن الصخور النارية تتميز بأنها توجد على شكل كتلي وأنها لاتحتوي على بقايا عضوية أوحفريات وأنها تتركب عادة من معادن متبلورة، ومن أنواع الصخور النارية الجرانيت والبازلت.

وبالنسبة للتجمعات البترولية فإن الصخور النارية ليست صالحة لهذا الغرض لانعدام المسامية والنفاذية بها، غير أنه وفي حالات محدودة أمكن العثور على البترول داخل تلك الصخور بسبب تعرض الأخيرة إلى عمليات التجوية والتحلل والتكسير مما خلق بينها شقوقا عديدة ومتشابكة تعمل كممرات جيدة لتجمع البترول، وفي مصر هناك عدد من حقول البترول التي تنتج أساساً من الصخور النارية القاعية basement rocks ذات التشققات العديدة كما هو الحال في حقول شعب على وخليج الزيت والغردقة وجيسوم الجنوبي بمنطقة خليج السويس.

أمثلة من الصخور النارية:

الجرانيت granite: وهو من أكثر الصخور النارية انتشاراً فمنه يتكون أساس معظم القارت كما يوجد على شكل سلاسل من الجبال الكبرى، والجرانيت صخر حمضي يتكون من معدن المرو(٣١٪) والفلسبار(٥٢٪) والميكا (١٢٪)، وفي بعض الأنواع يوجد الهورنبلند بدلاًمن الميكا وقد يحتوي على معادن أخرى بكميات قليلة وتختلف من نوع لآخر، ويقال للجرانيت أنه خشن إذا كانت بلوراته كبيرة الحجم (أكبر من ٢ مم)، أما إذا كانت صغيرة فيقال إنه ناعم أو دقيق الحبيبات، ويختلف لون الجرانيت تبعاً للون الفلسبار فقد يكون لونه أحمر أو رمادي وتتراوح كثافته النوعية من ٢٠٦-٢٠٧، وينتج عن تفتت الجرانيت انفصال المعادن المكونة له، كما تتحلل معادن الفلسبار والميكا بتأثير المياه المشبعة بثاني أكسيد الكربون إلى مواد صلصالية أما المرو فتستدير حبيباته وتتكون منها الرمال.

الديوريت diorite: صخر متوسط لا تزيد فيه نسبة السيليكا عن ٥٥٪ ولا يوجد به المرو عادة إلا في بعض الأحيان وبلورات الديوريت واضحة ويتكون أساساً من معدني الفلسبار والهورنبلند ولونه يكون مائلا للأخضر ووزنه النوعي ٢،٨.

البازلت basalt: أكثر الصخور البركانية انتشاراً، وهو قاعدي وتقل نسبة السيليكا فيه عن ٤٠٪ وهو أسود اللون وقد توجد بلورات دقيقة خضراء من معدن الأوليفين، وعادة ما تتخلله ثقوب نتيجة لتصلبه على سطح الأرض وخروج الغازات المحبوسة من الحمم البركانية (اللابة)، والبازلت صخر شديد التماسك ويتكون من بلورات مجهرية بينها مواد زجاجية، والمعادن الأساسية المكونة له هي البلاجيوكليز والأوجيت والأوليفين ووزنه النوعي ٣.

الدوليريت dolerite: صخر قاعدي أسود قاتم اللون وزنه النوعي ٢،٩ ويتكون من معدني البلاجيوكليز والأوجيت وأحياناً يوجد به الأوليفين في بلورات صغيرة منتشرة بينها حبيبات دقيقة من أكاسيد الحديد.

الصخور المتحولة وأمثلة منها:

الصخور المتحولة metamorphic rocks: هي صخور كانت في الأصل رسوبية أو نارية دفنت في الأعماق السحيقة في باطن الأرض حيث تعرضت إلى درجات حرارة عالية للغاية وضغط شديد وتحت هذه الظروف حدثت للصخر الأصلي تغيرات فيزيائية وكيميائية بدلت من نسيجه الصخري ولونه وبنيته، فالرخام مثلا $CaCO_3$ صخر متحول من الحجر الجيري $CaCO_3$، وأن الكوارتز SiO_2 صخر متحول من المرو SiO_2 وهكذا، ويعرف هذا النوع من التغير بالتحول التماسي أو الحراري حيث تتأثر الصخور المحيطة بالكتل النارية المتداخلة ذات الحرارة العالية وينتج عن ذلك إعادة تبلور بعض أو جميع المعادن المكونة للصخر الأصلي، أو أن يكون التغير عملية ديناميكية نتيجة للإجهادات الواقعة وتغير درجة الحرارة ينشأ عنها نمو معادن جديدة ذات أشكال مسطحة أو نصلية وهو ما يعرف بالتورق foliation كصخر الشيست schist والنايس gneiss مثلاً وبسبب نسيجها وبنيتها فإن الصخور المتحولة لا تشكل عادة خزانات صالحة للبترول إلا في حالات نادرة.

امثلة من الصخور المتحولة:

النايس gneiss: صخر متحول من الجرانيت أو الصخور النارية الجوفية الأخرى بتأثير الضغط والحرارة ويتكون من نفس المعادن الداخلة في تركيب هذه الصخور، إلا أن بلوراته ترتب نفسها في صفوف أو رقائق متوازية نتيجة للضغوط التي يتعرض لها الصخر الأصلي أثناء عملية التحول، وتكون معادن الأمفيبول والجارنت والميكا الصفوف الداكنة اللون، أما الفلسبار والمرو فتكون الصفوف الفاتحة اللون.

الكوارتزيت quartzite: ينتج هذا الصخر من تحول الصخور الرسوبية التي تحتوي كلية أو في أغلبها على المرو ثم الأحجار الرملية والصوان، ويتكون الكوارتزيت من هذه الصخور نتيجة إعادة تبلور المعادن المكونة لها بالتحول التماسي أو النطاقي، وأحيانا تترسب السيليكا كمادة لاصقة بين حبيبات الصخور الرملية مما يؤدي إلى تكون صخر الكوارتزيت، ويختلف لون صخور الكوارتزيت من القرمزي إلى الداكن نتيجة لوجود شوائب من أكاسيد الحديد، ويكون المرو حوالي ٩٨٪ من مكونات الكوارتزيت الذي يتميز بنسيج دقيق الحبيات، وهو من الصخور القوية التي تقاوم عوامل التعرية والتآكل.

الرخام marble: ينتج الرخام من تحول الصخور الجيرية أو الدولوميتية، ويختلف لونه اختلافاً كبيراً وهو أبيض اللون إذا تحول من صخور جيرية نقية، أما إذا كانت الصخور الجيرية تحتوي على شوائب فيصبح لون الرخام الناتج أحمرأو أخضر أو قرمزياً، ويتدرج نسيج الرخام من الأخشن إلى دقيق الحبيبات تبعاً لنوع الحجر الجيري أو الدولوميت الذي تحول منه الرخام وتبعاً لدرجة التحول.

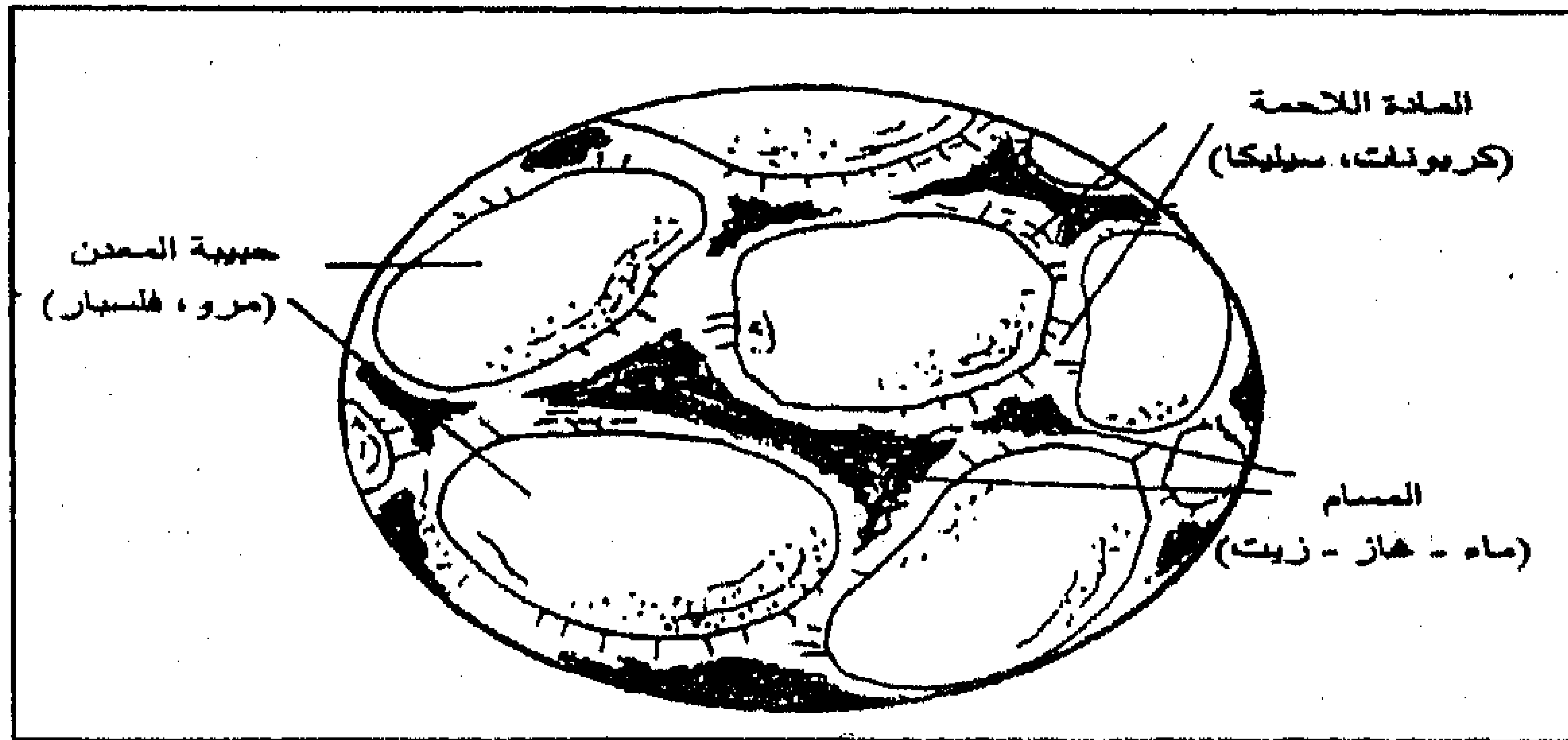
الصخور الرسوبية وأمثلة منها:

الصخور الرسوبية sedimentary rocks هي تلك الصخور التي تكونت نتيجة للنشاط الفيزيائي أو الكيميائي أو الحيوي على صخور الغلاف الصخري الموجود آنذاك والتي تعرضت لعمليات التجوية والتعرية ثم ترسبت بعد ذلك في المحيطات على الأرض بعد أن كانت عالقة في الهواء أو مذابة في الماء.

وتصنف الصخور الرسوبية عادة إلى قسمين هما: الصخور الفتاتية clastic والصخور الكيميائية chemical rocks وذلك بحسب مصدر المادة الصخرية التي تكونت منها هذه الصخور وطريقة ترسيبها.

الصخور الفتاتية:

تشكل الصخور الفتاتية جانباً كبيراً ومهماً من الصخور الرسوبية وهي تتكون من الفتات الصخري الذي ينتج عن تفكك أو تحلل الصخور الأصلية أيا كان نوعها وعند فحص الصخور الفتاتية تبدو أنها تتكون من ثلاثة مكونات رئيسة هي الحبيبات والمواد اللاحمة والمسام (شكل ٣-٣)، وتمثل الحبيبات grains الجزء الصلب من حبات الرمل أو الكوارتز أو الأصداف البحرية، أما المواد اللاحمة cementing materials فهي التي تعمل على تماسك الحبيبات ببعضها البعض وهي مختلفة التركيب فربما كانت سيليكية أو جيرية أو حديدية وغير ذلك من المواد اللاحمة، وأما المسام pores فهي تلك الفراغات التي نشأت بين الحبيبات وتكون عادة مملوءة بالموائع (ماء، زيت، غاز)، وفي الخزانات الحاملة للبترول نجد أن الماء الموجود في المسام الصخرية غالبا ما يكون مالحا أو حتى شديد الملوحة (ملح أجاج) brine حيث تعتبر المحيطات والبحار المصدر الرئيس لهذا الماء والذي نظراً لبقائه معزولاً داخل الرواسب المحتوية له على مدى الأزمنة الجيولوجية الطويلة فقد أدى ذلك إلى زيادة كبيرة في درجة ملوحته حيث تصل إلى أكثر من ١٠٠ جرام في اللتر مقارنة بملوحة ماء البحر والتي تبلغ عادة حوالي ٣٥ جرامات في اللتر أما المياه السطحية عادة ما تكون عذبة أو ضاربة في الملوحة (١- ١٠ جرامات في اللتر) وهو ما نراه في خزانات المياه الجوفية الموجودة على أعماق ضحلة نسبياً على غير خزانات البترول التي توجد عند أعماق كبيرة قد تصل إلى ٢٠٠٠ متر أو أكثر ويعتبر حجم الحبيبات الفتاتية التي تشكل الصخور الرسوبية ذا أهمية بالغة وكلما كبر حجم هذه الحبيبات ازدادت مسامية الخزان الجوفي وبالتالي نفاذيته لسريان الموائع خلاله من هيدروكربون وماء، وتصنف الحبيبات المفككة على أساس أقطارها بالمليمتر وذلك تبعاً لتصنيف وينتورث Wenthworth grain size على النحو التالي (جدول ٣-٢):



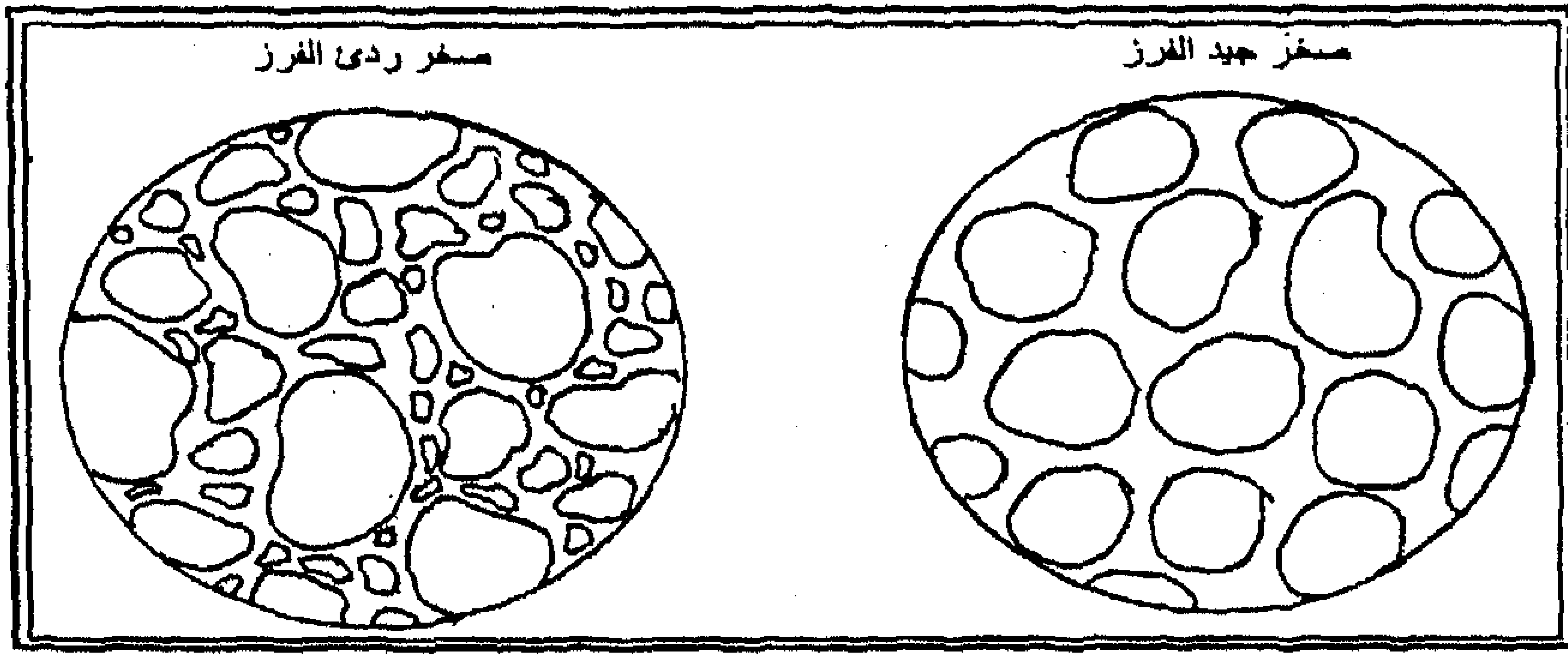
شكل ٣-٣: مقطع في صخر فتاتي يوضح هيكل الصخر والمادة اللاحمة والمسام.

جدول ٣-٢: تصنيف حجم الحبيبات الصخرية حسب تقسيم وينتورث.

حجم الحبيبة (مليمتر)	المصطلح
أكبر من ٢٥٦	جلمود boulder
٢٥٦-٦٤	حصاة cobble
٦٤-٤	حصباء pebble
٤-٢	حبيبة granule
٢-١/١٦	رمل sand
١/١٦-١/٢٥٦	غرين silt
أقل من ١/٢٥٦	صلصال (طين) clay

وتعتبر الحبيبات الدقيقة الحجم (الرمل – الغرين – الصلصال) هي الأكثر شيوعا في الصخور الرسوبية الفتاتية وفي الحالات القليلة تكون حجم الحبيبة والحصباء المكون الرئيس للصخر.

وإضافة إلى ما سبق فإن ما يعرف بالفرز sorting يدخل ضمن وصف الصخور الرسوبية وهذا العامل يوضح مدى انتظام حجم الحبيبات المكونة للصخر وتجانسه، فيقال إن صخرا جيد الفرز well sorted عندما يكون حجم حبيباته متقاربا بينما يوصف الصخر بأنه رديء الفرز poorly sorted عندما تتباين فيه حجوم حبيباته بين الكبيرة والصغيرة (راجع شكل ٣-٤) وعلى درجة الفرز يتحدد حجم المسام في الصخور الرسوبية الفتاتية، وفي الصخور رديئة الفرز تحتل الحبيبات ذات الحجم الصغير الفراغات الموجودة بين الحبيبات الأكثر حجماً الأمر الذي يؤدي إلى تدني مسامية الصخر وبالتالي إنخفاض كفاءته من حيث قدرته على احتجاز وإمرار الموائع خلاله، وتطلق على الصخور الجيدة الفرز الرمال النظيفة clean sand، بينما تسمى الصخور رديئة الفرز بالرمال الوسخة dirty sands، ولما كانت حبيبات الرمل ذات لون فاتح فإن الحجر الرملي النظيف يكون لونه فاتحاً أيضاً أما الحجر الرملي الرديء الفرز فلونه داكن بسبب احتوائه على كميات كبيرة من حبيبات الغرين والصلصال (الطفل) والتي تعرف بألوانها الداكنة.



شكل ٣-٤: مقطع في صخرين رسوبيين أحدهما جيد الفرز والآخر رديء الفرز.

ومن صفات الصخور الرسوبية أنها تتميز بتطبقها stratified أي أنها تترسب على هيئة طبقات strata الواحدة فوق الأخرى، كذلك فإن ليثولوجية lithology الصخور تعتبر مفتاحاً مهماً حول كيفية ترسيب تلك الصخور، فحبات الرمل وجسيمات الطين وأصداف الحيوانات تكون كل منها صخوراً رسوبية مختلفة، وكل منها قد ترسب تحت ظروف بيئية خاصة، كما أن التراكيب الرسوبية sedimentary structures مثل علامات النيم ripple marks وشقوق الطين mud cracks وغيرها تساعد في التعرف على البيئة التي تمت فيها هذه الترسبات، كذلك فإن وجود الحفريات fossils كبقايا للنباتات والحيوانات يعتبر أدوات مساعدة في التعرف أيضاً على الصخور الرسوبية حيث إن هذه الحفريات لا نجدها في أنواع الصخور الأخرى كالنارية والمتحولة.

الصخور الكيميائية:

أما بالنسبة للصخور الرسوبية الكيميائية النشأة فهي تلك التي ترسبت من مواد كانت ذائبة في الماء مثال ذلك الملح الصخري الذي يترسب نتيجة للتبخر من مياه البحر أو أنها قد ترسبت بواسطة أو بمساعدة النباتات أو الحيوانات وتكون على هيئة بقايا إفرازات نباتية أو حيوانية وتتشكل في أغلبها من مادة جيرية كالطباشير الذي يتكون نتيجة لتراكم حفريات بعض الحيوانات البحرية الدقيقة.

وتجدر الإشارة إلى أن ٩٩٪ من الصخور الرسوبية بالقشرة الأرضية يتكون من الطفل والحجر الرملي والحجر الجيري، كما أن الكثير من الصخور الرسوبية هي خليط من هذه الأنواع الثلاثة، ولهذا في أحوال كثيرة ما يوصف الصخر بأنه رملي أو طفلي أو جيري، ويبين الشكل ٣-٥ مثالاً للمسميات المختلفة انطلاقاً من المكونات الأساسية للصخر وهي الحجر الرملي والطفل والحجر الجيري.

أمثلة من الصخور الرسوبية الفتاتية:

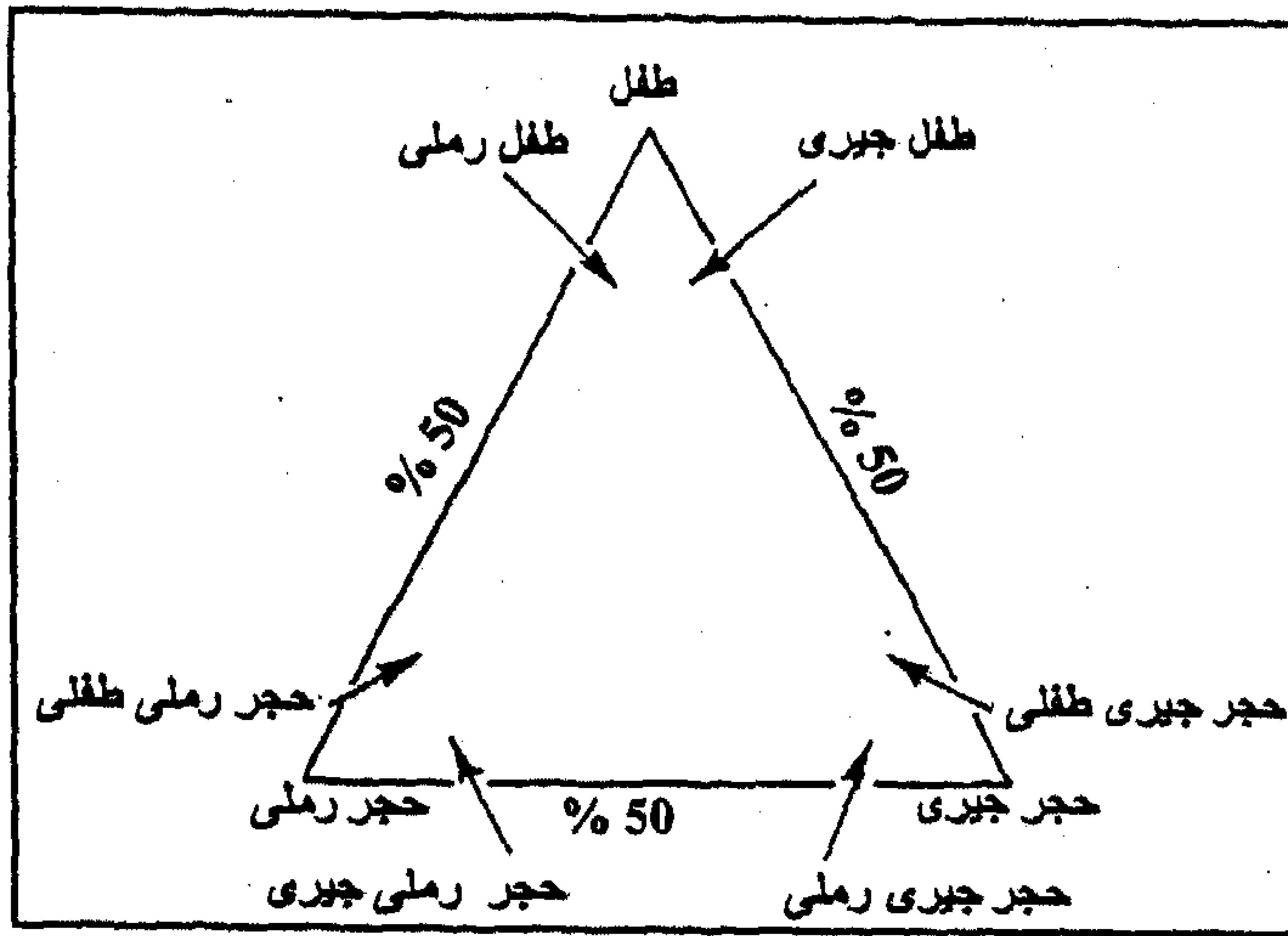
الكونجلومرات conglomerates: تتركب هذه الصخور من حبيبات في حجم الحصى أو الزلط متهاسكة بمواد لاحمة مختلفة التركيب كالسيليكا أو كربونات الكالسيوم أو أكسيد الحديد، وتتميز حبيبات هذه الصخور باستدارتها وملمسها الأملس مما يدل على انتقالها لمسافة كبيرة من مصدر تكونها، وتتكون الكونجلومرات (المدملكات) بالقرب من الشواطئ البحرية ويتم تماسك حبيباتها بمرور الزمن الجيولوجي.

البريشيا breccias: تشبه البريشيا الكونجلومرات في طريقة تكوينها إلا أن حبيباتها ليست كاملة الاستدارة فهي زاويّة الشكل كما أنها خشنة الملمس مما يشير إلى عدم انتقالها بعيداً عن مصدرها وبالتالي لم يقدر لها أن تهذب أو تستدير بفعل عوامل التعرية كما في حالة الكونجلومرات.

الرمال sands: يطلق لفظ رمل على كل صخر مفكك وغير متماسك يتراوح قطر حبيباته بين ٢مم إلى ١/ ١٦مم وهناك الرمل الخشن والرمل المتوسط والرمل الناعم، وإذا تماسكت حبيبات الرمل كونت ما نسميه بالحجر الرملي، وحبيبات الرمل عادة ما تكون مستديرة الشكل أو شبه مستديرة وتتركب أساساً من معدن المرو وبعض المعادن الثانوية كالفلسبار والميكا وربما بعض أكاسيد الحديد.

الحجر الرملي sandstone: وهو صخر يتركب من حبيبات مختلفة الأحجام أهمها معدن المرو، والحجر الرملي معدن ثابت ولا يتحلل ولا يتأثر بعوامل التعرية، وإذا كان الصخر نقياً فإنه يكون أبيض أو أصفر اللون، وقد يتلون باختلاف المعادن التي تدخل في تركيبه وهذه المعادن تتماسك مع بعضها بمادة لاحمة مثل السيليكا أو أكاسيد الحديد أو كربونات الكالسيوم، وهناك الحجر الرملي السيليسي siliceous sandstone والحجر الرملي الحديدي ferruginous sandstone والحجر الرملي الجيري calcareous sandstone والحجر الرملي الطيني argillaceous sandstone.

ويترسب الحجر الرملي على شواطئ البحار أو في مجاري الأنهار أو من الكثبان الرملية في الصحاري وهو يعتبر من أهم الصخور التي تشكل الخزانات البترولية في العالم نظراً لما يتمتع به من مسامية ونفاذية جيدة تؤهله لذلك.



شكل رقم ٣-٥: المكونات الأساسية للصخور الرسوبية.

الصخور الطينية:

تتركب هذه الصخور clays and shales من الطين وهو عبارة عن معادن دقيقة جداً لا ترى إلا بأجهزة خاصة ولها خاصية معروفة وهي أنها إذا خلطت بالماء فإنها تتحول إلى عجينة لزجة وتزداد في الحجم، وإذا جفت فإنها تتشقق. وتتكون الرواسب الطينية أساسا من معادن الكاولينيت kaolinite والمونتموريلونيت montmorillonite التي تركيبها الكيميائي هو سيليكات الألمونيوم المائية وتنتج من التحلل الكيميائي لمعادن مجموعة الفلسبار والتي تكون حوالي 60٪ من تركيب القشرة الأرضية، وتحتوي الرواسب الطينية أيضاً على معادن أخرى أهمها المرو والميكا وأكاسيد المنجنيز وبعض بقايا الحيوانات والنباتات المتحللة أو المتفحمة، وقد تزيد في الرواسب الطينية نسبة كربونات الكالسيوم فيسمى الصخر الناتج بالصلصال الجيري أو المارل marl.

والطين clay أو الصلصال وهو راسب طيني بحري متماسك جدا ودقيق الحبيبات، أما الطفل shale فهو صخر طيني يتشقق إلى صفائح دقيقة نظراً لتأثره بالضغط الواقع عليه، ويتباين لون الطفل من الأخضر إلى الرمادي إلى الأسود حسب المادة العضوية الموجودة به، وكلما كان اللون داكناً دل ذلك على ثرائه بالمادة العضوية، ويترسب الطفل على سهول الفيضانات وأيضاً في قيعان المحيطات والبحيرات والمستنقعات، ويعتبر الطفل الأسود black shale من الصخور المصدرية الشائعة بالنسبة للتجمعات

البترولية، أما الطفل الرمادي اللون فعادة ما يكون صخر غطاء للخزان البترولي الجوفي، أما حجر الطين mudstone فيشبه الطفل إلا أنه يكون محتوياً على حبيبات من الغرين والطين معا وذات أقطار بين ١/ ١٦ مم إلى أقل من ١/ ٢٥٦ مم، وهناك ما يعرف بطفل الزيت oil shale وهو يكون عادة غنيا ببعض مركبات زيت البترول وله رائحة وهو قابل للاشتعال.

الصخور الجيرية:

تتركب هذه الصخور الجيرية limestones من معدن الكالسيت ويلاحظ أن هذا المعدن قد يكون متبلوراً في بعض الأنواع من الصخور الجيرية، وتوجد أنواع عديدة من الحجر الجيري يختلف لونها وتركيبها حسب المعادن الأخرى التي تدخل مع الكالسيت، والصخور الجيرية بيضاء اللون عادة وربما مالت إلى اللون الرمادي بسبب وجود شوائب بها، وبالطبع فإن حبيبات معدن الكالسيت ليست شديدة الصلادة ويمكن خدشها بسكين، كما أنها تتعامل بسرعة مع حامض الهيدروكلوريك كما سبق أن ذكرنا، ويعتبر صخور الحجر الجيري من أهم الخزانات البترولية الشائعة في منطقة الشرق الأوسط، كما أن الحجر الجيري الداكن اللون عادة ما يكون غنياً بالمواد العضوية ويعتبر صخرا مصدريا للبترول والغاز الطبيعي، ومن أهم الصخور الجيرية ما يلي:

الصخور الجيرية الصدفية shelly limestone: وهي صخور غنية عادة بالأصداف كالمحاريات والقواقع وغيرها من الهياكل البحرية، وقد تكونت نتيجة لتراكم هذه الأصداف في موقعها.

الطباشير chalk: وهذا الصخر يتكون نتيجة لتراكم حفريات بعض الحيوانات الدقيقة البحرية التي لا ترى إلا بالمجهر وهو صخر أبيض اللون وأملس وناعم ويترك أثرا في اليد.

الصخور الجيرية الدولوميتية dolomite: وتتركب هذه الصخور من نسب مختلفة من كربونات الكالسيوم والمغنسيوم وتتكون في الطبيعة نتيجة للمحاليل المائية الأرضية الغنية بعنصر المغنسيوم الذي يتبادل بسرعة مع عنصر الكالسيوم الذي يوجد في الصخور الجيرية العادية ويتكون الدولوميت الذي غالبا ما يشكل خزاناً بترولياً جيدا نظراً لارتفاع مساميته عن الصخر الجيري الأصلي بنحو ١٣٪.

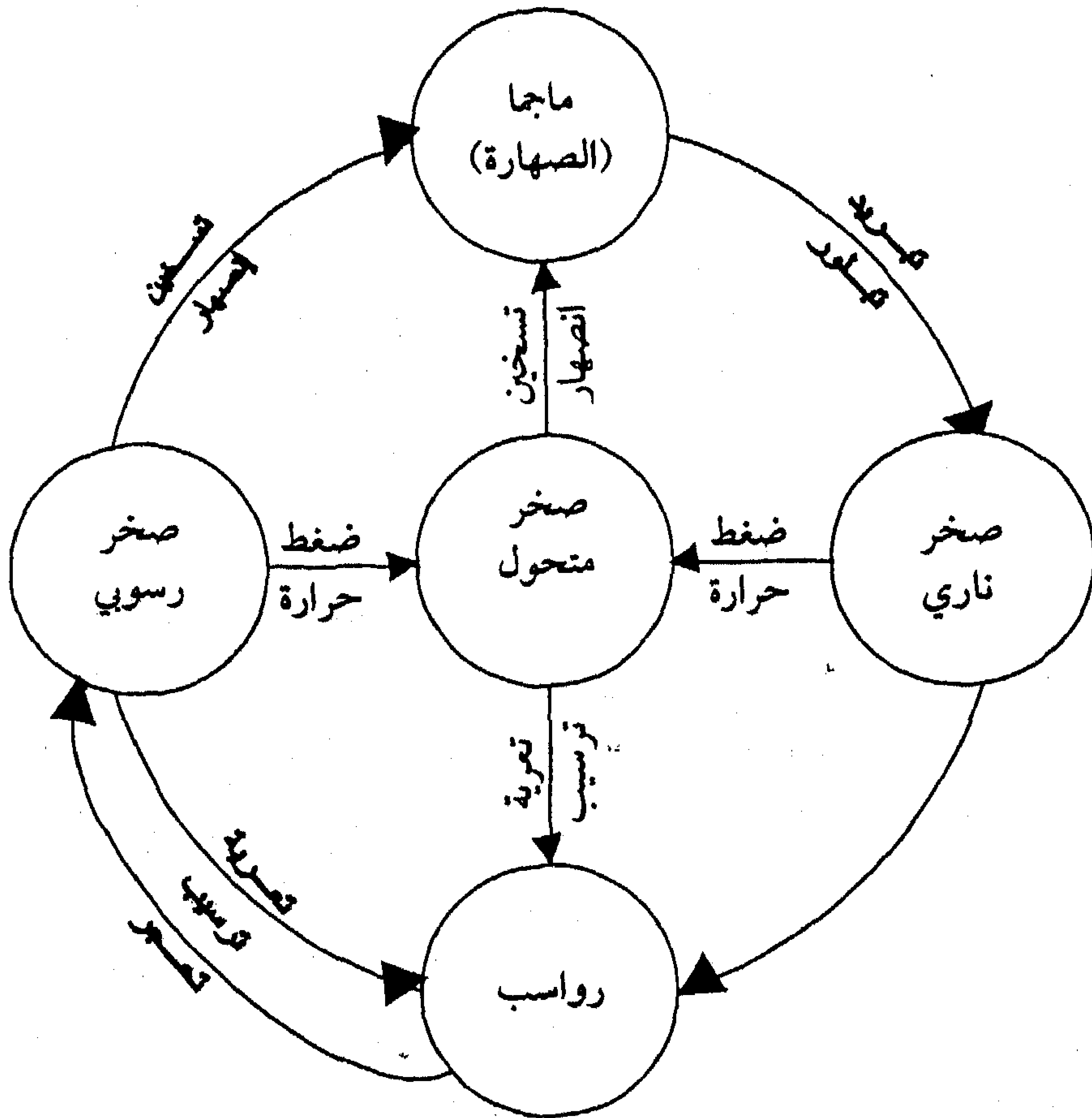
الصوان chert or flint: هو نوع غير متبلور من المرو شديد الصلادة ولا يمكن خدشه بالسكين كما أن مكسره أملس السطح ولكنه متعرج وله حواف حادة، ومن الصوان الملون الكالسيدوني والعقيق وقد يترسب الصوان مباشرة من المياه الأرضية أو بإعادة التبلور للأصداف البحرية المكونة من ثاني أكسيد السيلكون وذلك بفعل الحرارة والضغط، والصوان هو أكثر الصخور الرسوبية صلادة أثناء عمليات حفر الآبار.

الفحم coal: يتكون الفحم من بقايا النباتات التي دفنت وتحللت في باطن الأرض وتحولت إلى مادة الفحم بفعل الحرارة والضغط، والفحم يتراوح لونه بين البني والأسود وهو قصيف brittle، كما أنه ينتشر انتشاراً واسعاً في الطبيعة، وهناك ثلاثة أنواع ورتب من الفحم تبعا لنسيجها وتركيبها الكيميائي وتأثرها بدرجات الحرارة وهي اللجنيت lignite والفحم القاري bituminous coal والأنثراسيت anthracite، ويوجد اللجنيت في الطبيعة على هيئة طبقات رفيعة، ونظرا لعلو نسبة الماء به فإنه يتفتت بعد جفافه وهو لا يعطي كمية كبيرة من الحرارة، أما الفحم القاري فهو يحترق بسهولة ويعطي كمية حرارية عالية، وأما الأنثراسيت فهو أجود أنواع الفحم وله لمعان وبريق ملحوظ ويحترق بدون دخان ويعطي طاقة حرارية عالية وهو محدود الانتشار.

الدورات الجيولوجية والأحواض الترسيبية:

كما سبق أن ذكرنا يتكون الغلاف الصخري من خليط معقد من أنواع الصخور المختلفة التركيب هي نتاج لعمليات فيزيائية وكيميائية وبيولوجية تنشط في إطار دورات جيولوجية geologic cycles مستمرة ومتعاقبة على مدار الزمن الجيولوجي بين تلك الأنواع المختلفة من الصخور وذلك بسبب الحالة الديناميكية للأرض وما ينجم عنها من عمليات بناء وهدم، فمثلاً تنصهر الصخور لتتكون صهارة وينشأ عنها صخر ناري جديد يتعرض للتجوية وعوامل التعرية ومعه أيضاً الصخور الرسوبية والمتحولة ليتكون صخر رسوبي جديد وهذه جميعها ربما تتعرض لاحقاً لعمليات تشوه وضغط وحرارة شديدين فيتكون صخر متحول جديد وهكذا تتواصل الدورات والعلاقات بين أنواع الصخور المختلفة.

ويوضح الشكل ٣-٦ دورة الصخور والتي تؤدي إلى أي من مجموعات الصخور الثلاثة: النارية والمتحولة والرسوبية.



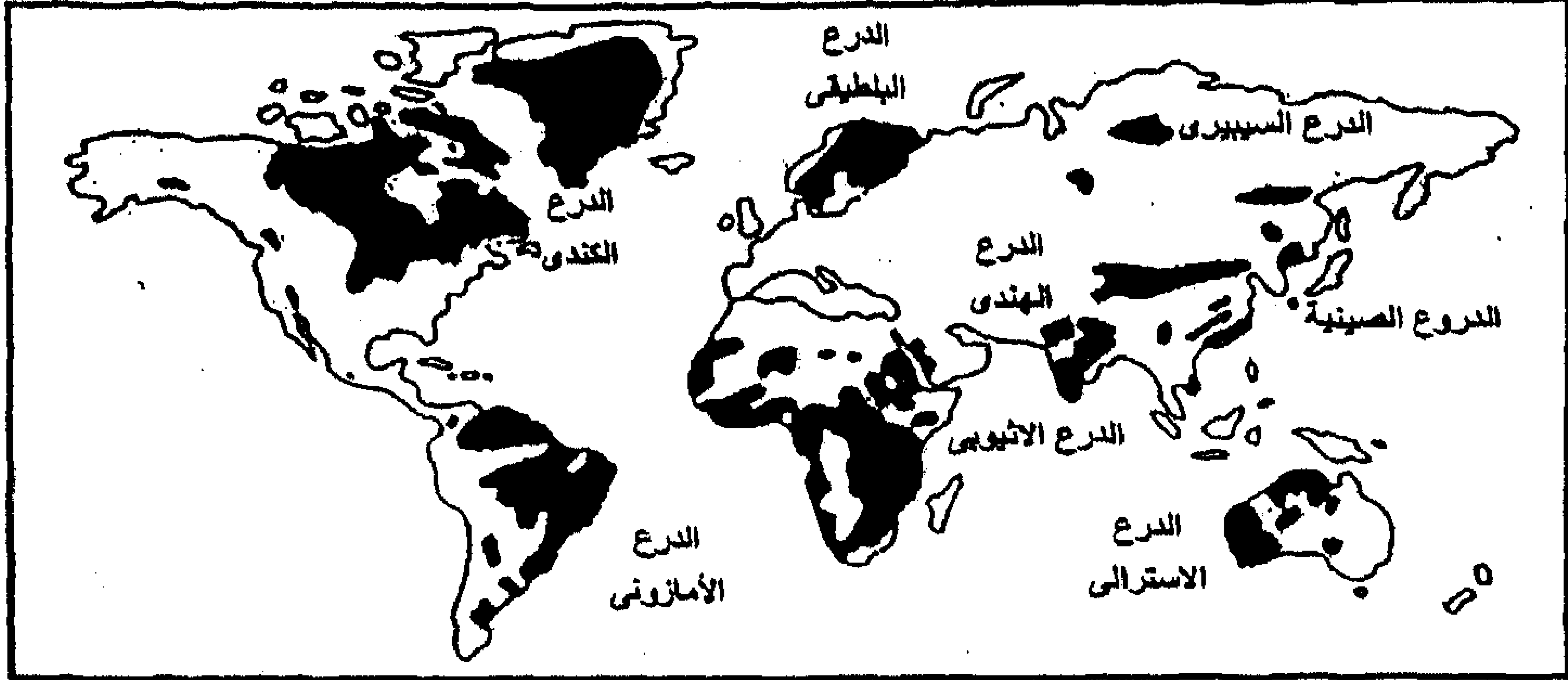
شكل ٣-٦: الدورة الصخرية.

وتشكل الصخور الرسوبية أهمية كبيرة بالنسبة للتواجدات البترولية وتعتبر مكوناً رئيساً في الدورة الصخرية لاحتوائها على الصخور المصدرية والصخور الخزانية حيث يتولد البترول ويختزن بها، أما الصخور النارية والمتحولة فتفتقر إلى تلك الخصائص إلا في حالات نادرة، ولقد أظهرت النتائج والدراسات أن الصخور التي تحمل البترول والغاز الطبيعي ترجع أعمارها إلى ملايين بل مئات ملايين من السنين، وطوال الفترة الزمنية التي مرت بها الأرض لم يكن سطح البحر مستقراً بل تفاوت بين ارتفاع وانخفاض بسبب تقدمه تارة وانحساره تارة أخرى.

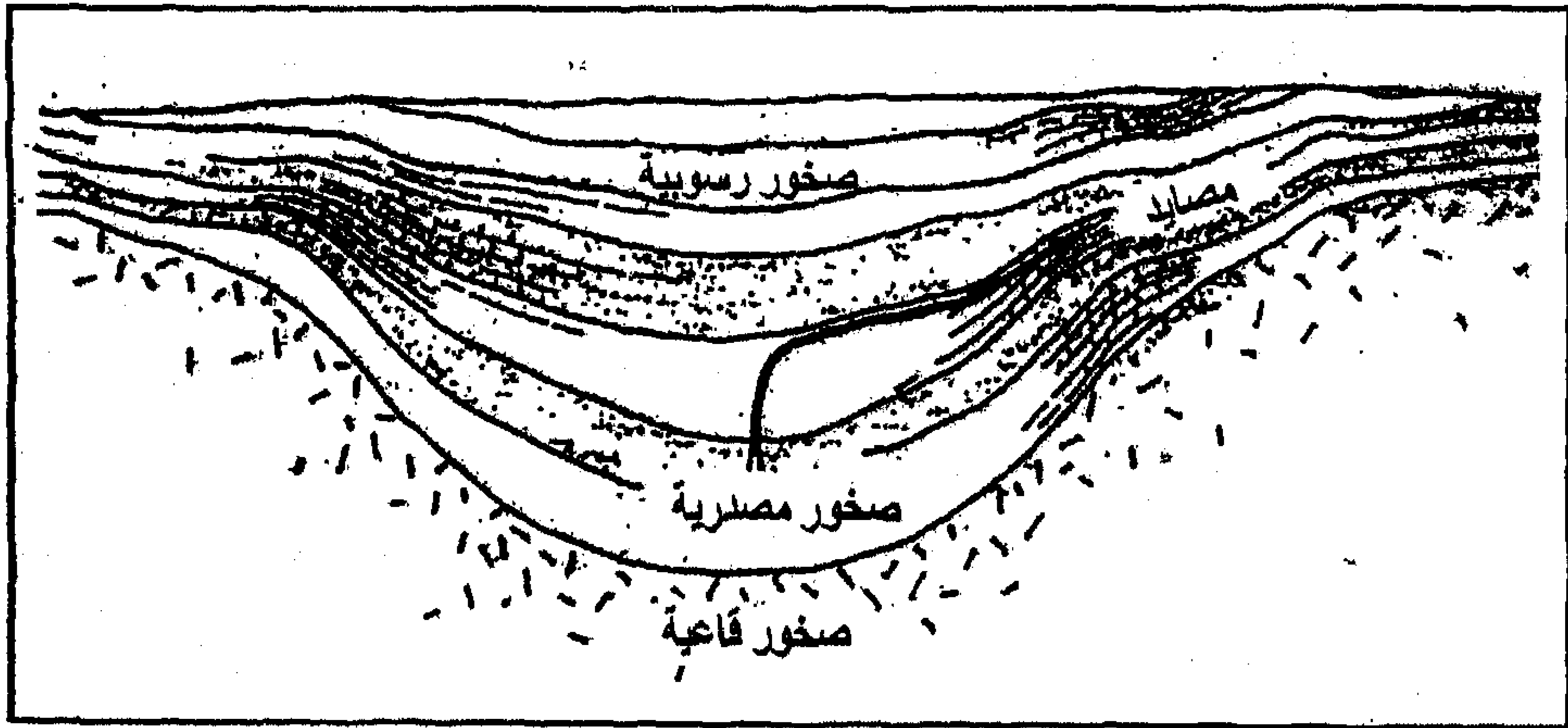
وأثناء ذلك كان يتم ترسيب الصخور على فترات متعاقبة حيث ترسبت الرواسب القديمة والطين في البحار الضحلة وتراكمت وترسبت الأصداف البحرية، ولم يكن ذلك لمرة واحدة بل من خلال العديد من الدورات الجيولوجية geologic cycles المتعاقبة والتي تباينت في عظمتها وانتشارها وتكرر حدوثها على فترات زمنية هائلة بلغت أحياناً مئات الملايين من السنين وربما أحياناً أخرى كانت دورات قصيرة تكررت على أزمنة بلغت عشرات من آلاف السنين، وهذه الدورات هي التي تسببت في تعاظم سمك الصخور الرسوبية بالقشرة الأرضية حيث تجاوز هذا السمك ٢٠٠٠ متر في بعض الأحيان، وإذا ما نظرنا إلى القطاع الجيولوجي لوجدنا أن هذه الصخور الرسوبية تتكون أساساً من الحجر الرملي والحجر الجيري والطفل وترقد فوق صخور قديمة متحولة ونارية تعرف بالصخور القاعية basement rocks والتي عند اختراقها عادة ما يوقف الحفر نظراً لصلابتها الشديدة وعدم أهمية هذه الصخور في عمليات البحث عن البترول والغاز إلا في حالات محدودة تكون فيها قد تعرضت للتكسير والتشقق ونشأت عن ذلك مسارات لهجرة البترول إليها كما هو الحال في عدد من مناطق العالم حيث تشكل صخور القاع مصدراً رئيساً لإنتاج البترول. وكما توجد الصخور القاعية في باطن الأرض فقد تبرز على السطح وتشكل ما يسمى بالدروع shields والتي تنتشر في قارات العالم بواقع درع أو أكثر بكل قارة (راجع الخريطة شكل ٣-٧)، وتتميز مناطق الدروع بخلوها من البترول ولكنها تكون غنية بالمعادن وتشكل مناطق جاذبة لصناعة التعدين حيث يستخرج منها الحديد والنحاس والرصاص والذهب والفضة وغيرها، وعلى سبيل المثال يعتبر الجزء الجنوبي الغربي من المملكة العربية السعودية أحد تلك الدروع والذي يسمى بالدرع العربي Arabian shield حيث توجد كل حقول البترول إلى ناحية الشمال الشرقي لهذا الدرع في الصخور الرسوبية الموجودة هناك.

وفي جهات أخرى من الأرض هناك ما يعرف بالأحواض الترسيبية sedimentary basins (شكل ٣-٨) وهي مناطق منخفضة تصب فيها المرتفعات المحيطة كميات هائلة من الرسوبيات التي قد يتجاوز سمكها عدة آلاف من الأمتار (في العادة ما بين ٦٠٠٠ إلى ١٢٠٠٠ متر)، كما أن الحوض الواحد قد يمتد طوله إلى مئات الكيلومترات ويمتلئ بالعديد من الصخور الرسوبية من حجر رملي وحجر جيري وطفل ومتبخرات وغيرها،

وبسبب هذا الاحتواء المتنوع نجد هناك الصخور المصدرية والصخور الخزانية والمصايد البترولية، ومن ثم كان الاهتمام بالبحث عن البترول والغاز في هذه الأحواض.

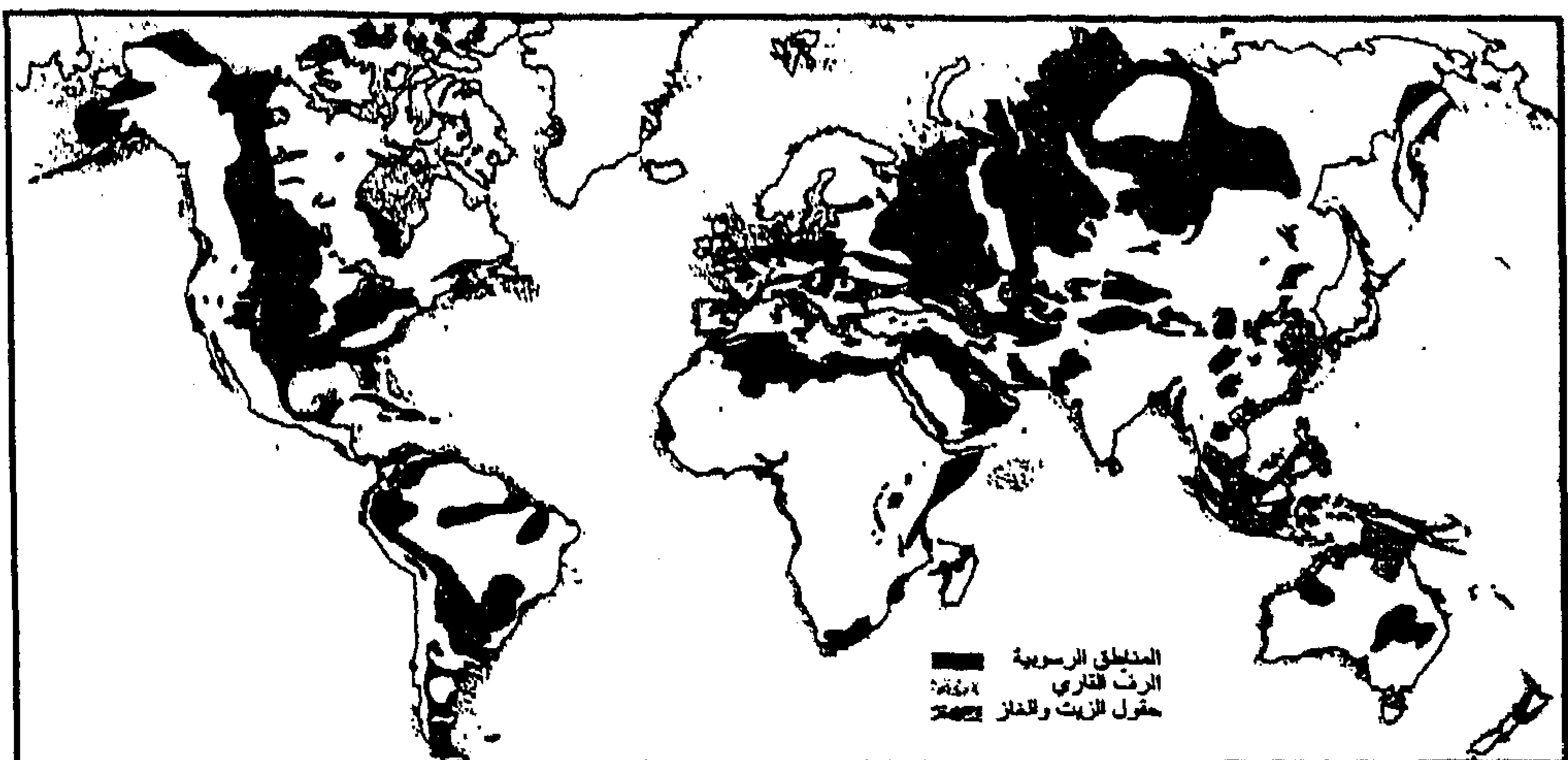


شكل ٣-٧: خريطة توضح مواقع الدروع والمناطق حيث تظهر صخور ما قبل الكمبري القديمة على سطح الأرض (اللون الأسود).



شكل ٣-٨: قطاع جانبي تخطيطي لأحد الأحواض الترسيبية يبين أنوع الصخور المختلفة والمصايد البترولية.

ويبين الشكل ٣-٩ أحواض الزيت المحتملة ومناطق الإنتاج الرئيسة في العالم، ويتضح منها أن تجمعات البترول الكبيرة موجودة في الأحواض الضخمة في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا ونيجيريا والغرب الأوسط من الولايات المتحدة وفي أمريكا الجنوبية، ثم حول جبال الأورال والقوقاز، أما أحواض القارة الأسترالية فلا تحتوي إلا على عدد محدود من حقول البترول.



شكل ٣-٩: أحواض الزيت المحتملة ومناطق الإنتاج الرئيسة في العالم.

وليس بالضرورة أن يحتوي الحوض السميك من البترول أكثر مما يحتويه الحوض الرقيق، فحوض الشرق الأوسط وهو أرق الأحواض البترولية العظيمة في العالم إذ لا يتجاوز سمكه نحو ١٠ آلاف متر (٣٠ ألف قدم) هو أعظم من غيره إنتاجاً بكثير، ولكن حوض كاليفورنيا الذي يتراوح سمكه بين ٢٠-٢٥ ألف متر (٦٠-٧٠ ألف قدم) هو مع وفرة إنتاجه أقل إنتاجاً بكثير من حوض الشرق الأوسط.

ومن ناحية أخرى هناك أحواض بترولية عديدة تمتد نحو البحر فتدخل في الرف القاري المحيط بقارات الأرض ويصل هذا في العادة إلى حيث يبلغ عمق البحر ٢٠٠ متر، وقد أحرزت أعمال الاستكشاف في الرفوف القارية تقدماً كبيراً بخليج المكسيك وبحر الشمال والبحر المتوسط وغيرها، وقد تخطي النشاط الاستكشافي البحري في الوقت الحاضر ليصل إلى أعماق سحيقة (حوالي ألفي متر) وفي ذلك إنجاز كبير وغير مسبوق.

وفي الأحواض الترسيبية تم اكتشاف أغلب حقول البترول المنتجة وذلك بسبب توافر الشروط الثلاثة للعثور على الزيت والغاز الطبيعي والتي تتمثل في وجود الصخور المصدرية والخزانية والمصايد البترولية، وفي العالم هناك نحو ٦٠٠ حوض ترسيبي، ومن الأحواض التي تم اكتشافها من خلال حفر الآبار بها حيث بلغت نسبة الحقول المنتجة نحو ٤٠٪، أما الـ ٦٠٪ الأخرى فقد كانت خاوية barren وأغلب الظن أنه لم تتوافر بها تلك الشروط حيث خلت من الصخور المصدرية أو أن هذه الأخيرة لم تترسب على

أعماق كافية لتولد البترول أو أن البترول قد تولد بالفعل ولكن يكون قد هلك لسبب أو لآخر، أو لأن المصايد البترولية قد تكونت في زمن لاحق لهجرة البترول إليها، أو لأن درجات الحرارة في باطن الأرض قد تجاوزت الحدود مما لم يسمح بتولد الخام من المادة العضوية المصدرية.

ومن أمثلة الأحواض الترسيبية المعروفة حوض بحر قزوين Caspian basin الذي يصل فيه الغطاء الرسوبي إلى نحو ٢٦٠٠٠ متر، وحوض خليج المكسيك Gulf of Mexico basin، وحوض سرت Sirte basin بليبيا الذي يحتوي على أكثر من ٢٣ حقلا بترولياً كبيراً، و١٦ حقلاً بترولياً عملاقاً وتقدر الاحتياطيات البترولية المؤكدة فيه بحوالي ٤٢ بليون برميل من الزيت ويمثل نحو ٨٠ ٪ من إجمالي الاحتياطيات البترولية هناك، كذلك حوض أبو الغراديق Abu Gharadig basin بالصحراء الغربية في مصر (الغطاء الرسوبي نحو ١٧٠٠٠ متر) الذي قد تم به اكتشاف عدد من حقول البترول والغاز الطبيعي لشركتي بترول خليج السويس (جابكو) وبدر الدين للبترول (بابيتكو) وتجاوز حجم الاحتياطيات البترولية به النصف بليون برميل زيت مكافيء.

الفصل الرابع
تجوية وتعرية الصخور واللاتوافق

عرفنا في الفصل السابق أن الصخور الرسوبية تترسب في الأصل على هيئة طبقات ذات تتابع أفقي ولكن هذه الصخور لا تلبث أن تتعرض لتشوهات deformation وتغيرات في سحنتها ووضعها التركيبي بسبب العمليات الجيولوجية (الخارجية أو الداخلية) التي قد تؤثر عليها مما يجعلها على وجه الخصوص مؤهلة لتكون صخوراً خزانية للموائع المختلفة من بترول وغاز وماء ونقدم في هذا الفصل شرحاً مفصلاً لعمليات التجوية وتعرية الصخور بالإضافة إلى ما يحدث من عدم توافق بين طبقات الصخور المترسبة.

تعريف التجوية:

تعد التجوية weathering من أهم العمليات الجيولوجية على سطح الأرض، وتعرف بأنها التكسير والتفكك الفيزيائي والكيميائي للصخور تحت الظروف الجوية العادية وهي تعتبر مصدراً لمعظم المواد التي تكون الصخور الرسوبية.

التجوية الفيزيائية أو الميكانيكية:

وتحدث هذه التجوية عندما تتفتت الصخور إلى كسارات أصغر وأصغر دون أن يطرأ تغيير في تركيبها الكيميائي، وقد يحدث ذلك بفعل الصقيع frost عندما تتجمد المياه في شقوق الصخور وفي فجواتها حيث تتمدد وتحدث ضغطاً كافياً لتفكك الصخور وتفتيتها، أو بسبب التسخين والتبريد المتبادل خاصة في المناطق الجبلية والصحراوية حيث تتعرض الصخور إلى تغيرات حرارية كبيرة ودائمة نتيجة لانخفاض درجة الحرارة ليلاً والتي قد تصل أحياناً إلى درجة التجمد، ويتسبب التمدد والانكماش في تكوين شقوق صغيرة وفراغات تسمح بعملية التجوية وتفكك الصخر وتحلله، كما تساعد النباتات والحيوانات على تفكك الصخور ذلك أن جذور الأشجار تعتبر عوامل مساعدة في تفتيت الصخور، كذلك فإن الحيوانات القارضة والحفارة تعمل هي الأخرى على تفكيك الصخر ونقل فتاته إلى سطح الأرض.

التجوية الكيميائية:

ويحدث هذا النوع من التجوية chemical weathering بفعل العمليات الكيميائية المختلفة كالأكسدة والتميؤ والكربنة والذوبان، وعادة ما ينتج عن هذه التجوية تغير في التركيب الكيميائي للمعادن الأصلية المكونة للصخور وتكون معادن جديدة قد تتسبب من ناحيتها في تفكك جديد للصخر.

إن بعض المعادن مثل البيريت FeS_2 عندما يتعرض للأكسدة oxidation يكون أحماضاً وهذه تتفاعل مع الصخور الموجودة بها وتعمل على تحللها وتفككها، كما أن الكثير من المعادن والصخور تتعرض للتميؤ hydration حيث يعمل اتحاد الماء مع المواد الأخرى على زيادة حجم الصخور وتمددها ومن ثم تفككها، كما أن اتحاد غاز ثاني أكسيد الكربون الموجود أساساً في الجو مع الماء وهو ما يعرف بعملية الكربنة carbonation يكون حامض الكربونيك H_2CO_3 الذي يتفاعل مع الحجر الجيري ويعمل على إذابته وبالتالي خلق نقط ضعف في الصخر تؤدي إلى تفككه، كما يمكن للماء المتغلغل في الصخور أن يكون عاملاً مؤثراً في إزالة وذوبان بعض المعادن الموجودة وكذلك المواد اللاحمة للحبيبات الصخرية، ويمثل التمفصل jointing الذي يوجد بكثرة في الأحجار الجيرية نقطة ضعف للصخور مما يساعد على ذوبانها ويؤدي إلى تفككها وتجويتها، كما تعتبر المغارات والكهوف أمثلة واضحة في الصخور الجيرية لهذا النوع من التجوية الكيميائية، وهي كثيرة في بلدان الشرق الأوسط مثل لبنان والأردن ومصر وغيرها.

التعرية وعواملها المختلفة:

تعرف التعرية erosion بأنها مجموعة العمليات التي تختص بنقل وإزالة الحطام الصخري الناتج عن تجوية الصخر الأم من مكانه بفعل العوامل الخارجية إلى السهول أو البحار حيث مكانها الجديد وذلك من خلال عمليات الأكسدة والكربنة والذوبان وغيرها، وفي الواقع فإنه من الصعب فصل عمليات التجوية والتعرية عن بعضهما فصلاً تاماً وذلك لأنه لا بد لإتمام عملية التجوية واستمرارها من وجود حد أدنى من النقل يتم أساساً بواسطة عوامل التعرية والتي تشمل في المقام الأول الجاذبية الأرضية والرياح والمثالج والأمواج والأنهار.

• **الجاذبية الأرضية:**

للجاذبية الأرضية دور مؤثر في تحريك ودفع الحطام الصخري إلى أسفل، ويتجلى ذلك فيما يعرف بالانزلاقات الأرضية landslides والتي تكون على هيئة كتل كبيرة متحركة من الصخور وبسرعة عالية نسبياً أو على هيئة انسيابات طينية mudflows تتمثل في تحرك كتلة كبيرة من الطين والصخر والماء إلى أسفل وبشدة تجتاح كل ما يعترضها، ويحدث هذا النوع من الانسياب في بعض المناطق القاحلة والمناطق الجبلية شبه القاحلة التي تتعرض لأمطار غزيرة بشكل غير عادي، وعادة ما تسبب الانزلاقات الأرضية والانسيابات الطينية دماراً كبيراً للأشياء التي تعترض مسارها، ولعلنا نتذكر تلك الكوارث التي حدثت بسبب ذلك في جنوب الصين وبنجلاديش وباكستان وأيضاً في مصر بالنسبة لهضبة المقطم وغيرها من أماكن أخرى في العالم وتسببت في قتل وتشريد مئات بل آلاف من الأشخاص وأحدثت أضراراً بيئية بالغة، كما أن بعض الانسيابات الطينية قد تسببت في انهيار عدد من المنصات البحرية بدلتا نهر المسيسيبي وذلك بسبب عدم استقرار وثبات قاع البحر في تلك المنطقة وقد وصل عدد المنصات التي أصابها الحدث إلى ٢٤ منصة على مدار السنة، كما أنها أحدثت أضراراً لأكثر من مائة خط من خطوط الأنابيب.

• **الرياح:**

للرياح wind خاصة عندما تشتد سرعتها يتعاظم أثرها في نقل الصخور المفككة وجسيمات التربة من مكان إلى آخر، وعلى سبيل المثال فإن الكثبان الرملية sand dunes هي نتاج عمل الرياح وتتميز هذه الرواسب بأنها جيدة الفرز وتشكل عدداً من أفضل خزانات البترول والغاز الطبيعي، وبالطبع فإن عمل الرياح يكون مؤثراً في المناطق الصحراوية القاحلة حيث تكون نسبة الرطوبة ضئيلة والتربة شبه جافة، وما تحمله الرياح معها هو الرمل الناعم الدقيق الحبيبات، أما الرمل ذو الحجم الكبير مثل الرمل الخشن والحبيبات فهو ثقيل نسبياً ولا تقدر الرياح على حمله إلى مسافات بعيدة، كما أن الجسيمات ذات الحجم الدقيق كالغرين والصلصال تكون عالقة بالهواء ويمكن أن تنتقل إلى مسافات كبيرة خلال العواصف الترابية dust storms ومع اتجاه الرياح، أما الرمل الناعم فتكون حركته على هيئة وثبات saltations في الهواء وعلى علو قد يصل إلى أكثر من النصف متر متقدماً من مكان إلى آخر حتى يجد استقراره في النهاية.

● **المثالج:**

المثالج glaciers هي انسيابات لكتل جليدية تتكون في المناطق الباردة والتي تتساقط فيها الثلوج بغزارة وبفعل التجمعات الهائلة من هذه الثلوج والضغوط الواقعة عليها تتحول إلى كتل متجمدة من الجليد ice، وتتحرك هذه الكتل الجليدية بفعل الجاذبية الأرضية وتحمل معها خليطاً غير متجانس من الركام الصخري الذي يتباين في حجمه من الكتل الضخمة إلى الحبيبات الدقيقة من الرمال والطين، وعندما ينصهر الجليد ينجرف الحطام الصخري لتتكون منه رواسب تعرف بالركام المثلجي moraine، وعند البحث والتنقيب عن البترول يشكل هذا الركام عقبة في انتشار الموجات الصوتية واختراقها للطبقات التحتسطحية أثناء العمل السيزمي، وقد يبلغ سمك الركام المثلجي ما بين ١٥-٣٠ متراً. ومنذ نحو عشرة آلاف سنة كانت المثالج تغطي نحو ثلث مساحة اليابسة ولكنها انحسرت في الوقت الحاضر لتغطي أجزاء محدودة من الأرض خاصة في المناطق القطبية

وتجدر الإشارة إلى أنه قد سجلت حديثاً رواسب المثالج ضمن تتابعات العصر الكربوني في أقصى جنوب غرب مصر في هضبة الجلف الكبير، مما يشير إلى أن هذه المنطقة كانت جزءاً من المنطقة القطبية للأرض والتي كانت تغطي جزءاً كبيراً من الصحراء الكبرى في ذلك الوقت.

● **الأمواج:**

تتولد الأمواج waves في البحار والمحيطات بفعل الرياح، وعندما ترتطم الأمواج على الشواطئ فإن قوة الارتطام تعمل على تهشم الجروف الصخرية cliffs المحيطة بالشواطئ وتفتيتها، ومما يساعد الأمواج على عملية التعرية ما تلتقطه أثناء ارتطامها من صخور متفتتة ترفعها وتقذف بها الجروف من جديد فتزيد من قوتها على النحت والتعرية، والصخور التي تتكون منها الشواطئ تتفاوت في صلابتها ومقاومتها لقوة الأمواج؛ لذا نرى أن أغلب الشواطئ الصخرية متعرجة وغير مستقيمة وقد تتكون بها الكهوف والأنفاق الشاطئية بفعل عمليات التعرية المتواصلة، كما قد تحدث للشواطئ وبسبب الأمواج انهيارات أرضية نتيجة لوجود طبقات متبادلة من صخور صلبة وأخرى رخوة كصخور الحجر الجيري والطباشير التي تغطي طبقات من الطفل أو الطين، كذلك فإن وجود الفواصل الرأسية على الشواطئ الرسوبية يعزز من عمليات التعرية وتآكل المادة الصخرية ونقلها إلى أمكنة جديدة.

• **الأنهار:**

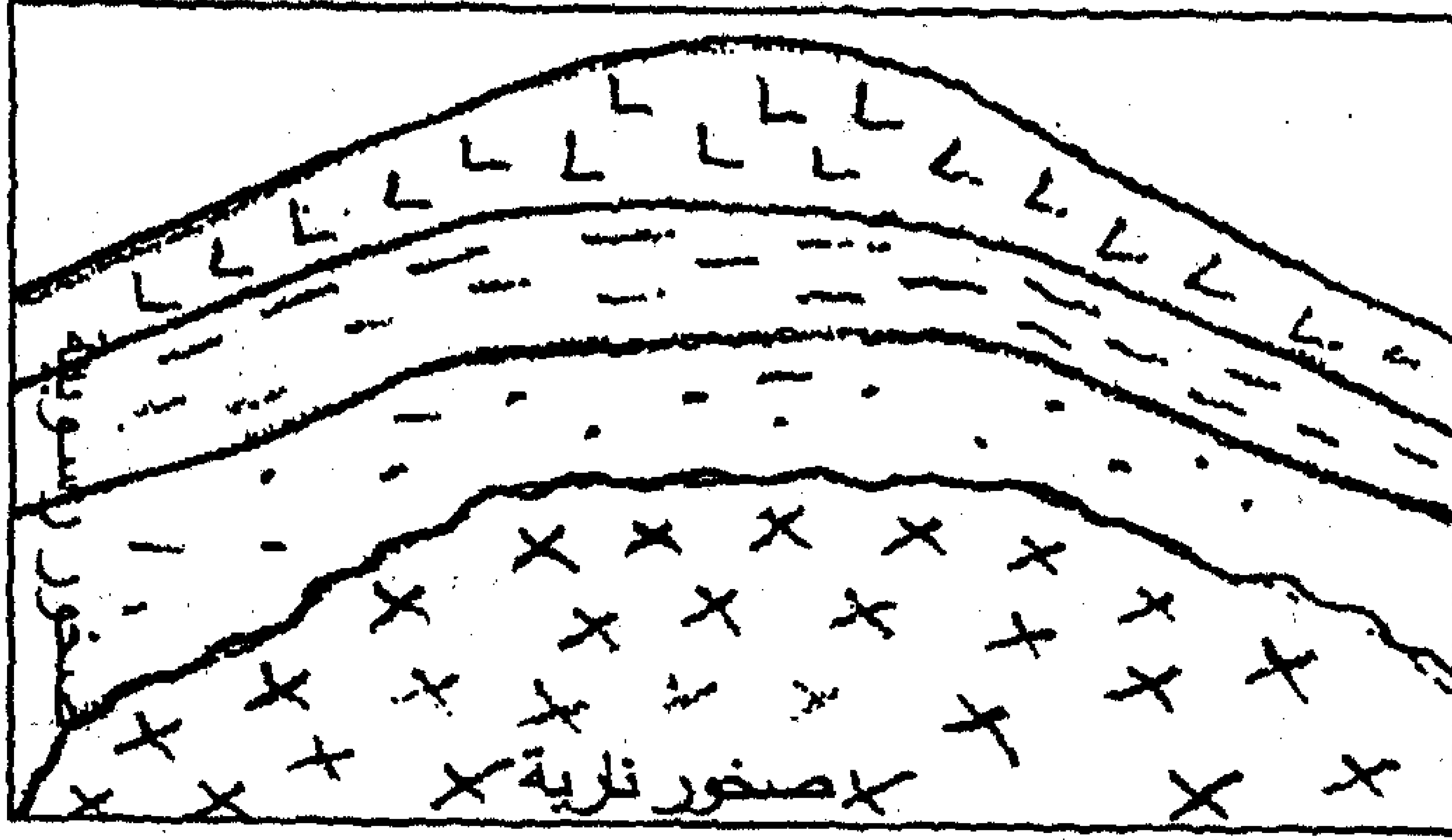
تعتبر الأنهار rivers من عوامل التعرية الهامة حيث إنها تحمل معظم حمولتها من المواد التي تكسرت من القشرة الأرضية وبكميات هائلة لترسبها في البحار، وتعتمد قدرة النهر على حمل المواد الصخرية على سرعة وحجم الماء في المجرى وتشتد سعة النهر وقدرته على حمل الحجوم الكبيرة من الصخور في فترات الفيضان، وحمولة الأنهار تتشكل من مواد عالقة بالماء أو ذائبة فيه أو مواد متدحرجة على طول قاع المجرى المائي، ويرسب النهر هذه الحمولة عندما تقل سرعته وقدرته على الحمل، وتسمى المواد المترسبة بالطمي alluvium والذي يحتوي على مواد فرزت على أساس حجمها ومن ثم فإنها تترسب على شكل طبقات وتكون المواد الأكثر حجماً عند قاع الطبقة، وبالإضافة إلى ذلك فإن المواد الطمية تتكون عادة من كسارات صخرية استدارت وأصبحت ملساء بفعل التعرية والنقل، وبفضل عمليات التعرية وترسيب المواد الصخرية المنقولة بواسطة الأنهار تعمل الرواسب النهرية في أحوال غير قليلة كصخور مصدرية للبترول وخزانات جيدة له كما سنرى فيما بعد.

اللاتوافق:

ذكرنا فيما سبق أن الصخور الرسوبية يتم ترسيبها على هيئة طبقات بعضها فوق بعض مكونة تتابعاً طبقياً يعرف بالتتابع المتوافق conformable succession ويكون أقدم الطبقات في أسفل التتابع وأحدثها في أعلاه، هذا ما لم يتعرض التتابع لحركات أرضية قوية يكون من نتيجتها اختلال هذا التتابع ونجد مثلاً بعض الطبقات في وضع أفقي فوق صخور أقدم منها ومائلة أو مطوية، ويسمى التتابع في هذه الحالة بالتتابع غير المتوافق unconformable succession، فعلى مدى الزمن الجيولوجي كان مستوى سطح البحر متغيراً، فتارة يعلو هذا المستوى بتقدم البحر نحو اليابسة وتارة يهبط بتراجع البحر وانحساره فتنكشف الصخور على السطح لفترة زمنية مما يعرضها إلى عمليات التجوية والتعرية، وتسمى هذه السطوح القديمة التي تعرت بسطوح اللاتوافق unconformity surfaces وهي تدل على اضطراب في عملية الترسيب يصحبه ضياع جزء من السجل الجيولوجي يمثل فترة تطول أو تقصر من الزمن، هذا ويمكن تمييز ثلاثة أنواع من اللاتوافق نتناولها فيما يلي:

- **اللاتوافق التبايني:**

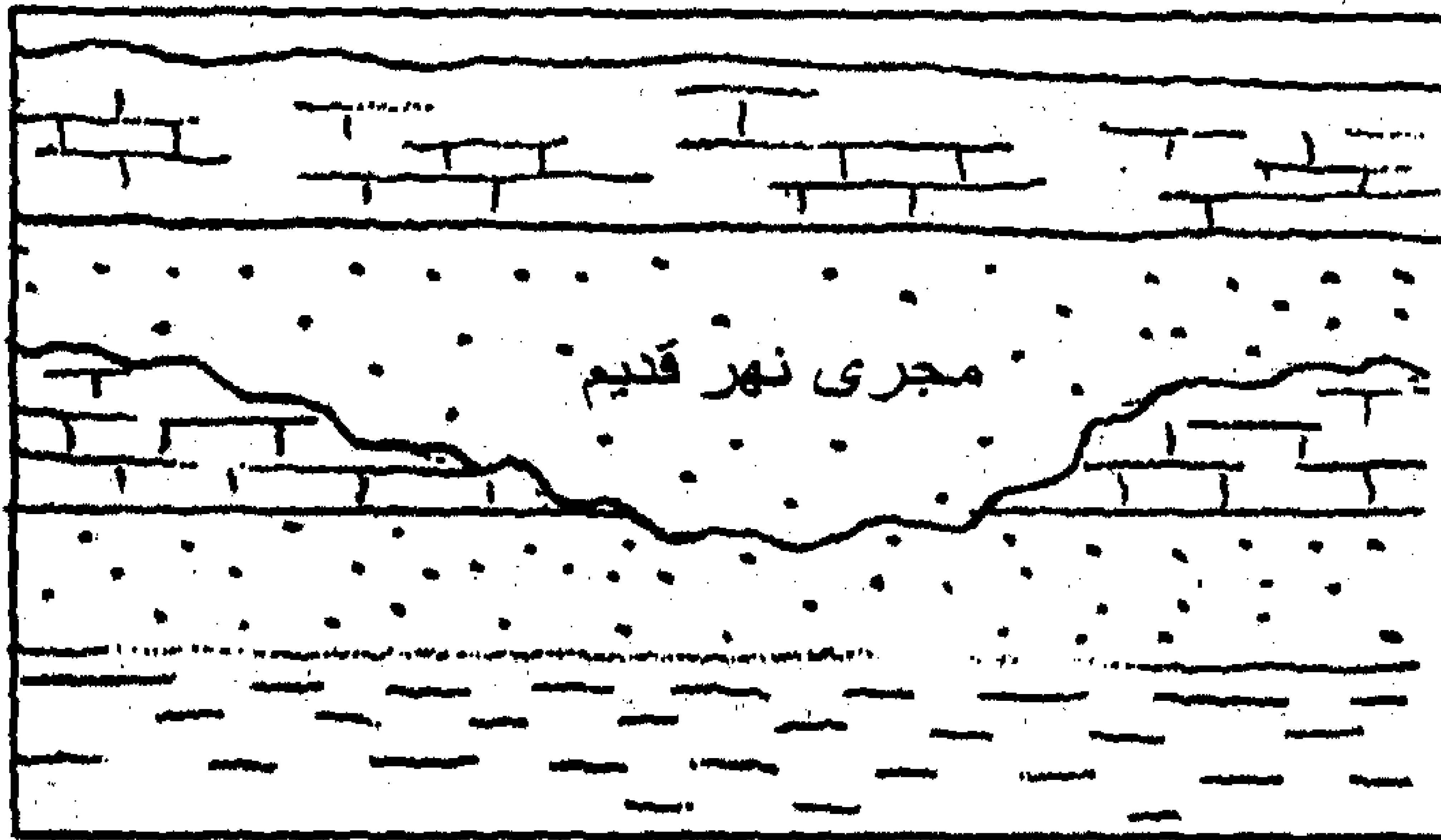
ويتكون هذا النوع من اللاتوافق التبايني non-conformity عندما تقع صخور رسوبية متطبقة فوق سطح تعرية لصخور نارية أو متحولة قديمة ويسهل التعرف عليه من اختلاف النوعيات الصخرية الموجودة كما في شكل ٤-١.



شكل ٤-١: لاتوافق تبايني.

- **اللاتوافق التخالفي:**

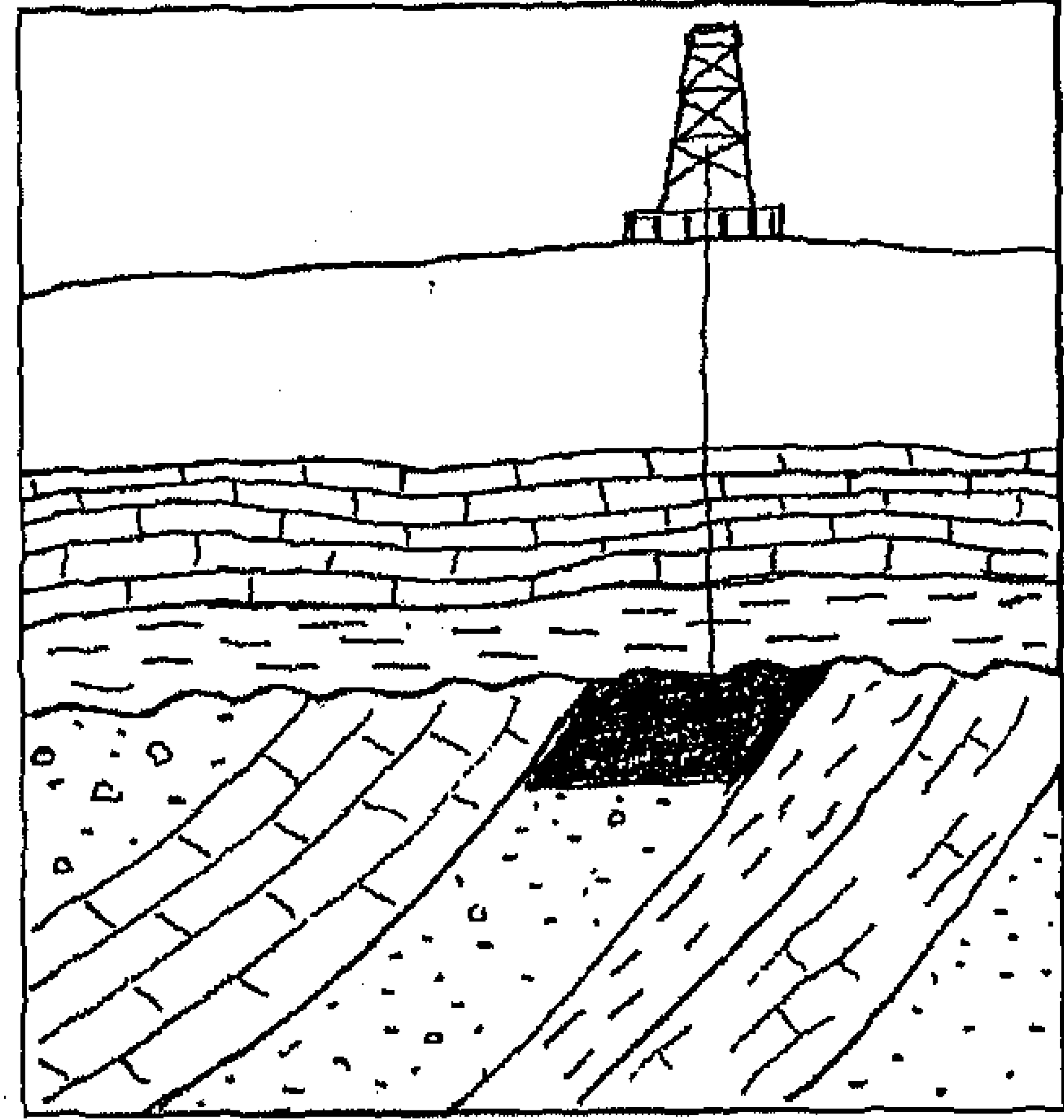
وفي هذه الحالة تكون الصخور التي فوق وتحت سطح التعرية متوازية، ويتمثل هذا النوع من اللاتوافق في مجاري الأنهار القديمة والتي تعرت وامتلأت في مرحلة لاحقة بالرمل الذي تحول في النهاية إلى حجر رملي، كما أن النهر قد تغير مجراه القديم إلى مجرى آخر، وعندما يتقدم البحر ويغطي المنطقة فإنه يدفن المجرى القديم تحت السطح وتتوالى الرواسب الجديدة ويتكون بذلك نوع من اللاتوفق التخالفي disconformity (شكل ٤-٢).



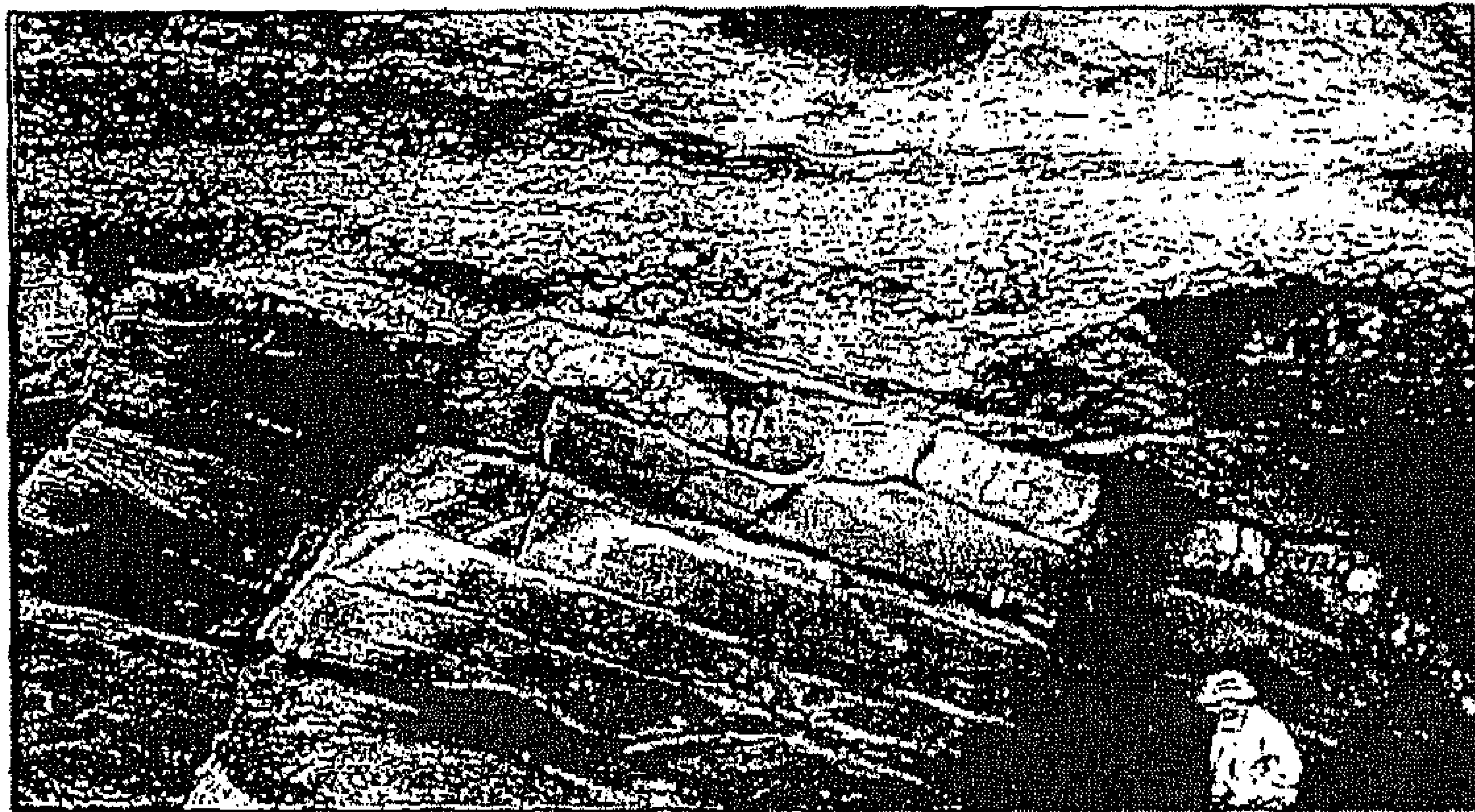
شكل ٤-٢: لاتوافق تخالفي.

- **اللاتوافق الزاوي:**

وهو أكثر أنواع اللاتوافق وضوحاً حيث تكون الطبقات التي فوق سطح التعرية غير موازية للطبقات التي تحته، ويدل هذا النوع من اللاتوافق على أن نسق الطبقات التي تقع تحت سطح اللاتوافق قد مالت طبقاته أو طويت قبل أن تتعرض للتعرية والترسيب اللاحق للطبقات التي فوقها (شكل ٤-٣أ وب). وتكون سطوح اللاتوافق الزاوي angular unconformity مصايد مهمة للبترول والغاز حيث تشكل الطبقات الموجودة تحت سطح التعرية خزانات جيدة للبترول وعادة ما تكون من الحجر الرملي أو الحجر الجيري المسامي، أما الصخر الرسوبي الذي يعلو سطح التعرية فيعمل كصخر غطاء غير منفذ وهو مكون عادة من الطفل أو الملح، وأما الصخور المصدرية للبترول غالباً ما تكون من الصلصال الأسود الغني بالمواد العضوية التي ينشأ منها البترول والذي يهاجر فيها بعد ليستقر بالصخر الخزان داخل المصيدة البترولية كما سوف يأتي الحديث عن ذلك في فصل لاحق.



شكل ٤-٣أ: لاتوافق زاوي.



شكل ٤-٣ب: صورة واقعية للاتوافق الزاوي حيث تبدو صخور رسوبية ترقد أفقياً فوق صخور أخرى مائلة.

ونظراً لأن اللاتوافق الزاوي يغطي مناطق شاسعة، لذا تشكلت حقول ضخمة للبترول والغاز من هذا النوع من اللاتوافق مثل حقل شرق تكساس بالولايات المتحدة وحقل خليج برودهو Brudhoe Bay في ألاسكا، وحيث لا تعطي الطبقات السطحية أية انطباعات عما هو مخبأ في باطن الأرض من تجمعات بترولية هائلة.

ويرجع اكتشاف حقل شرق تكساس إلى عام ١٩٣٠ ويبلغ طوله نحو ٧٢ كيلو متراً وعرضه ٨ كيلومترات، وتم حفر أكثر من ٣٠ ألف بئر به ويقدر حجم الاحتياطي من الزيت الخام في هذا الحقل العملاق بأكثر من ٧ بلايين (مليار) برميل، ويوجد البترول في طبقة الحجر الرملي (Woodbine Sandstone) من العصر الطباشيري تحت سطح اللاتوافق عند عمق ١٠٧٠ متراً تقريباً، وتعمل طبقة الطباشير غير المنفذة (Austin Chalk) والتي تعلو سطح اللاتوافق مباشرة على احتباس الزيت داخل الخزان الجوفي (شكل ٢٣-٩)، وكان الحجر الرملي وودباين في هذه المنطقة قد ترسب في الأصل على هيئة طبقة أفقية عندما غطت مياه البحر منطقة شرق تكساس منذ حوالي ١٠٠ مليون سنة وتلت ذلك رواسب أخرى، وفي زمن لاحق حدثت حركة أرضية تسببت في تقوس وتجعد الحجر الرملي وانكشافه على السطح، وقد أدى هذا الانكشاف وبفعل العمليات الجيولوجية إلى تآكل وتعرية الصخور في الأجزاء العليا من التقوس والتجعد، وعند غزو البحر من جديد للمنطقة ترسبت طبقة الطباشير ورواسب أخرى غطت سطح اللاتوافق الزاوي، وكان الزيت الموجود بخزان الحجر الرملي تحت سطح التعرية قد تكون في طبقة الصلصال الغنية بالمادة العضوية ثم هاجر من هناك ليستقر داخل الصخر الخزان، وللعلم فقد بلغ الإنتاج التراكمي من حقل شرق تكساس حتى اليوم ما يقرب من ٥ بلايين برميل من الزيت الخام، وسوف نتناول هذا المثال من جديد في الفصل الـ ٢٣ حول آلية الدفع داخل الخزان لإستخلاص أكبر قدر من الزيت الخام.

وبالإضافة إلى أنواع اللاتوافق التي سبق شرحها فإنه يمكن تمييز أنواع عديدة من ذلك اللاتوافق بناء على طول الفترة الزمنية التي يمثلها مثل اللاتوافق الإقليمي regional unconformity عندما يغطي سطح اللاتوافق مساحات كبيرة من الأرض وعلى مدى فترة زمنية طويلة تعرضت خلالها الصخور القديمة لعوامل التعرية، كذلك فهناك اللاتوافق المحلي local unconformity عندما يكون مقصوراً على منطقة محدودة والزمن الذي يمثله يكون قصيراً، وقد يكون الانقطاع في التتابع نتيجة عدم ترسيب فحسب دون التعرض لعوامل التعرية.

الفصل الخامس

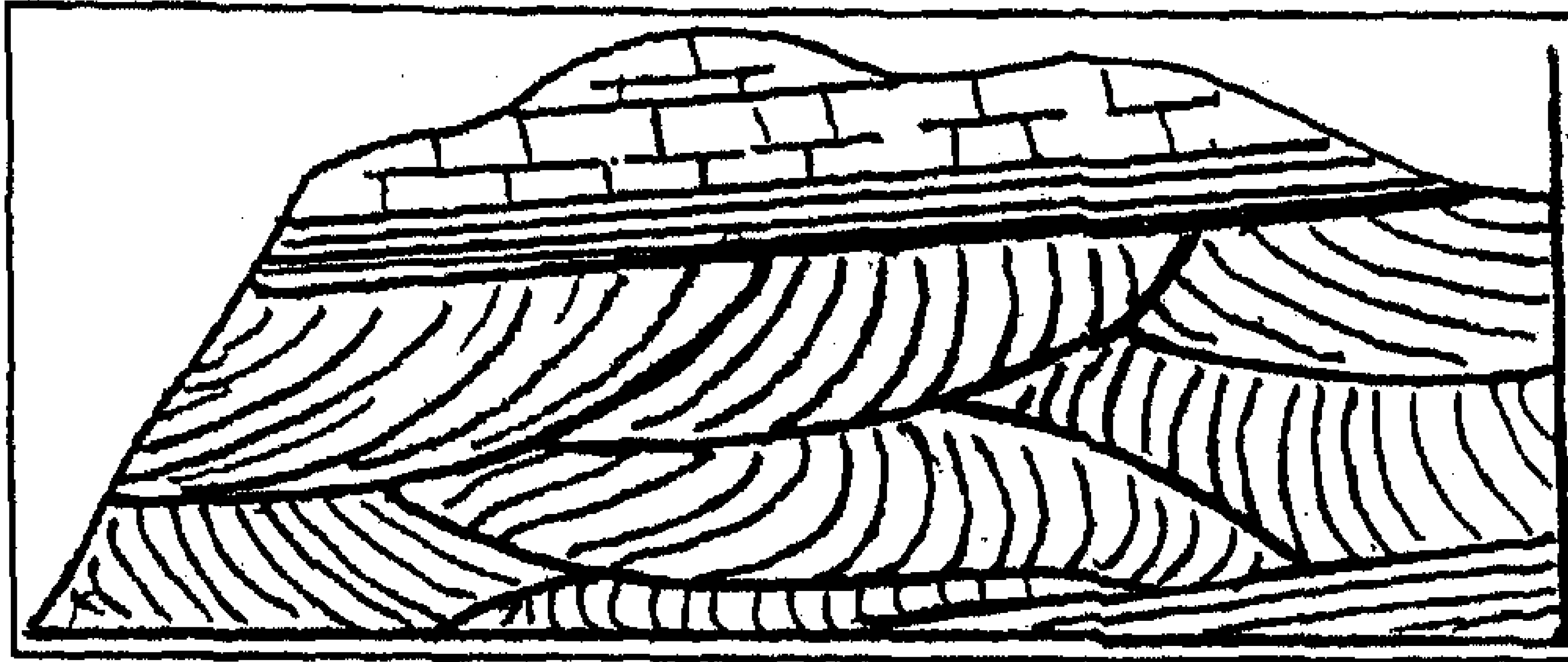
التشوهات الصخرية والتراكيب الجيولوجية

ذكرنا في السابق أن الصخور تأخذ أشكالا وأوضاعاً مختلفة أثناء تكونها، فالصخور النارية مثلاً تكون غالباً على هيئة كتل ضخمة massive أو على شكل قواطع وسدود أو على هيئة طفوح بركانية، أما الصخور الرسوبية فتكون على هيئة طبقات متتابعة الأحدث فوق الأقدم وغالباً ما تكون أفقية عند ترسيبها، أما الصخور المتحولة والتي كانت في الأصل صخوراً رسوبية أو نارية فقد تتخذ تركيباً صفحياً foliated يشبه الطبقات الرقيقة للصخور الرسوبية ولكنه لايمثل طباقية حقيقية أو أصلية، كما تتعرض الصخور لمؤثرات خارجية قد تتسبب في إحداث تشوهات في تركيبها. وتصنف التراكيب الجيولوجية geologic structures في الصخور إلى نوعين رئيسين (تراكيب أولية وتراكيب ثانوية) وذلك حسب الظروف التي تتعرض لها هذه الصخور والتي أدت إلى نشأة هذه التراكيب والتي تأكدت أهميتها وعلاقتها بالبحث والتنقيب عن البترول والغاز الطبيعي كما سنشاهد فيما بعد.

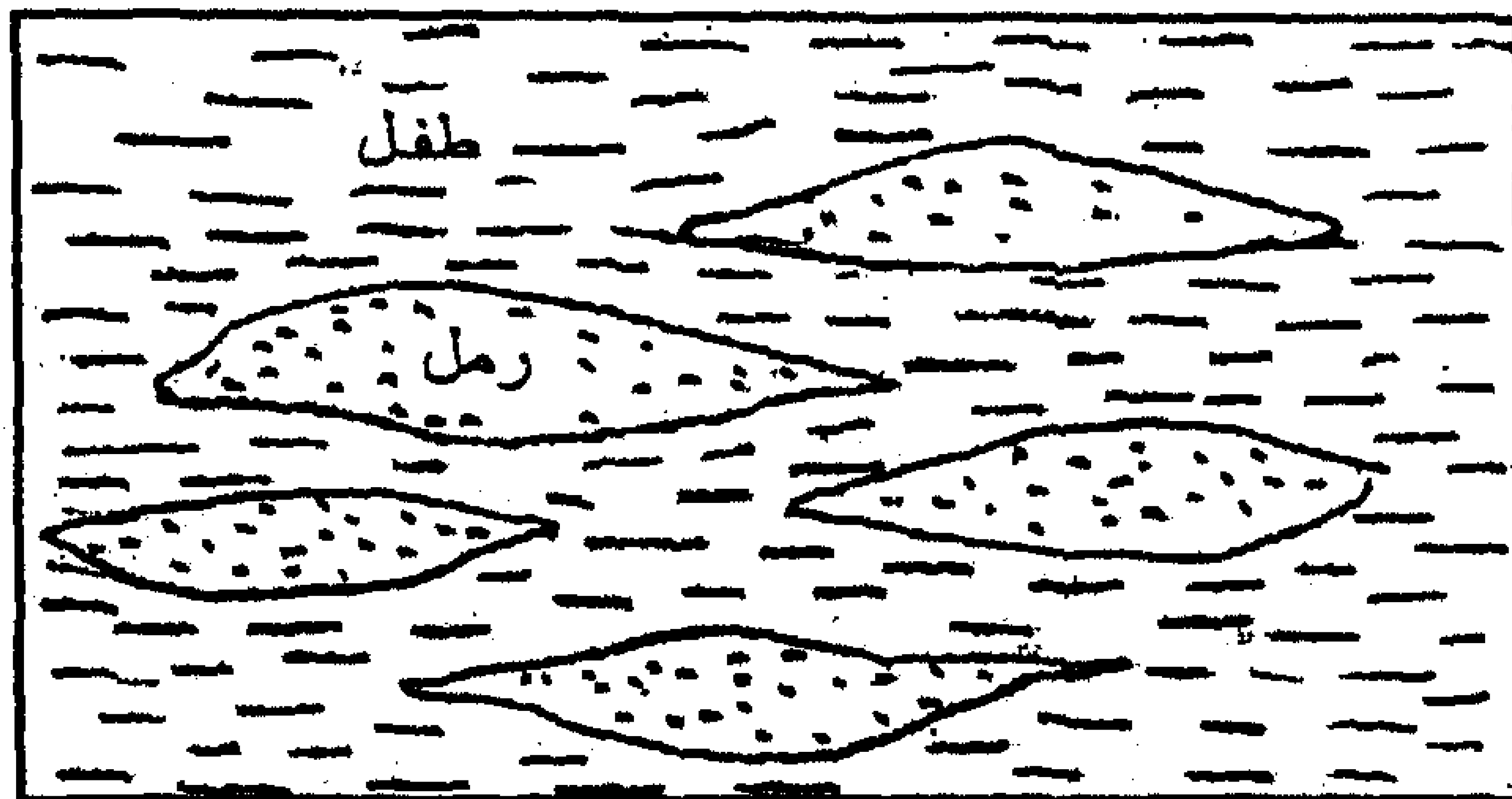
التراكيب الأولية:

تعرف التراكيب الأولية primary structures بأنها تلك الهيئة التي يكتسبها الصخر أثناء تكونه حيث يلاحظ مثلا – كما أوردنا آنفاً– أن الصخور الرسوبية تترتب في الأصل في طبقات أفقية الواحدة فوق الأخرى وأن كل طبقة قد ترسبت تحت ظروف طبيعية واحدة ولها سمك متجانس، ويسمى السطح الفاصل بين كل طبقة وأخرى بسطح الطباقية bedding plane وإذا كانت أسطح الطباقية متوازية ومتقاربة يعرف الصخر الرسوبي بأنه جيد التطبق well bedded، أما إذا كانت غير واضحة ومتباعدة فالصخر رديء التطبق poorly bedded، أما إذا تعذرت رؤية أسطح الطباقية فيطلق على الصخر بأنه عديم التطبق unbedded. وبجانب الطباقية الحقيقية هناك طباقية كاذبة أو متقاطعة false or cross bedding وهي تلك الطباقية التي تنشأ عن ترتيب طبقات رقيقة في مستويات متقاطعة على سطوح الطباقية ويتم ذلك بفعل التيارات المائية أو الهوائية كما هو الحال في الرواسب النهرية أو الشاطئية أو في الكثبان الرملية (شكل ٥-١)، وإضافة إلى

ذلك فهناك أيضا الطبقات العدسية lenticular التي قد تتكون عند امتلاء القنوات المائية أو الأنهار بالرواسب الرملية حيث تأخذ شكلا عدسياً ويتضاءل سمكها تجاه أطرافها (شكل ٥-٢)، ولعلنا نتذكر كذلك ظاهرة اللاتوافق والتي تعتبر من التراكيب الأولية التي اكتسبتها الصخور عند نشأتها حيث تدل سطوح اللاتوافق على حدوث تعرية للصخور خلال فترة زمنية أو على الأقل انقطاع في الترسيب بين صخور قديمة وأخرى أحدث منها، وقد بينا أهمية هذا النوع من التراكيب وعلاقته بالتجمعات البترولية الكبيرة.



شكل ٥-١: الطبقات الكاذبة أو المتقاطعة.



شكل ٥-٢: الطبقات العدسية.

التراكيب الثانوية وأنواعها:

تنشأ التراكيب الثانوية secondary structures في الصخور نتيجة لضغوط رأسية أو أفقية تتعرض لها صخور القشرة الأرضية أثناء الحركات الأرضية الشديدة والتي تحدث على نطاق كبير، وهناك نوعان من هذه الحركات الأرضية نلخصها فيما يلي:

- الحركات البانية للجبال orogenic movements: وهي حركات تكون فيها المُركّبات الأفقية هي القوة المؤثرة وينتج عنها تغيرات كبيرة في شكل وحجم الصخور وتؤدي إلى نشوء الجبال وتطور بنيانها.

- الحركات البانية للقارات epeirogenic movements: وهي حركات تكون فيها المُركَّبات الرأسية هي القوة الفعالة وتؤثر على مساحات كبيرة من القشرة الأرضية مكونة الهضاب والمنخفضات ولكن لا ينشأ عنها تغيرات في شكل الصخور.

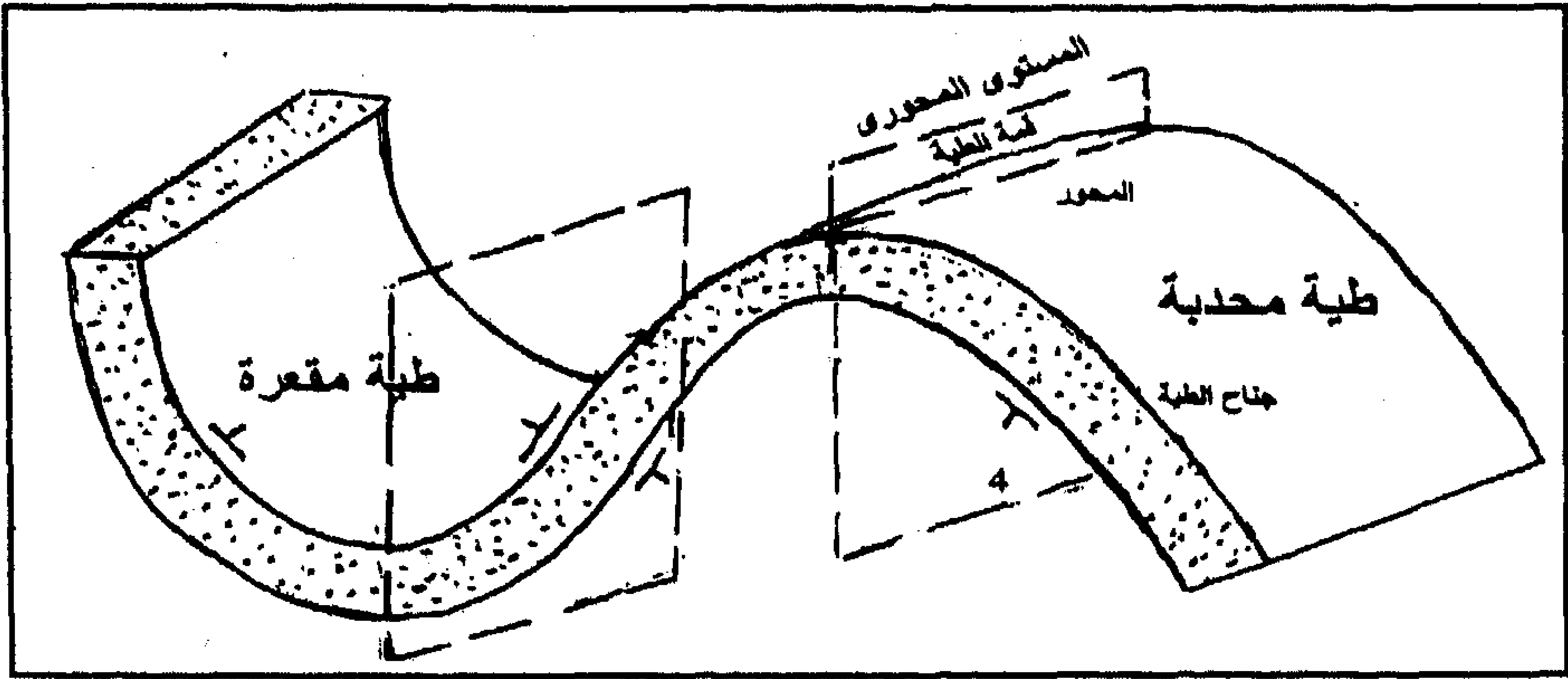
ولا يقتصر دور الحركات الأرضية على تغيير وضع الصخور الرسوبية من طبقات أفقية في الأصل إلى مائلة بل رأسية وربما تكون مقلوبة تماماً، وليس هذا هو التغيير الوحيد في الوضع الطبيعي للطبقات بل أن هذه الطبقات تعاني من تشوهات deformations وتغيرات كثيرة في الشكل تظهر في هيئة تراكيب متعددة من طيات وصدوع وكسور مختلفة تعرف بالتراكيب الثانوية إذ هي تحدث في زمن لاحق لوقت الترسيب، ونظراً لأهمية هذه التراكيب في الاستكشاف والبحث عن البترول فسوف نتناولها بقدر من التفصيل.

أنواع التراكيب الثانوية:

يمكن تقسيم التراكيب الثانوية في الصخور الرسوبية إلى ثلاثة أقسام كبيرة هي: التجعدات (الانثناءات)، والصدوع، والفواصل.

(١) التجعدات:

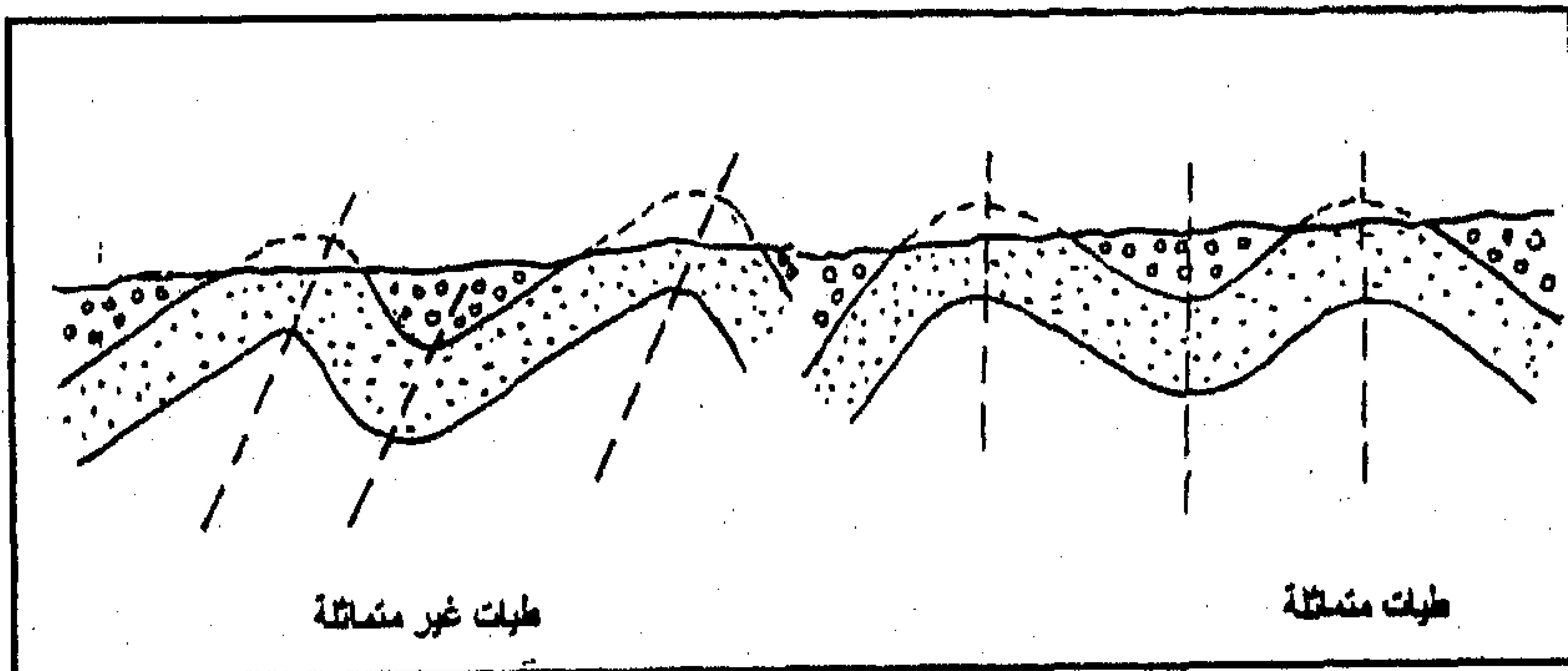
التجعدات folds هي تلك التشوهات التي تنتاب طبقات الصخور الرسوبية واستجابتها للضغوط الجانبية الشديدة حيث تتحول إلى تموجات وثنيات، وتسمى التموجات التي إلى أعلى بالطيات المحدبة أو التحدبات anticlines والتموجات التي إلى أسفل بالطيات المقعرة أو التقعرات synclines كما هو موضح بالشكل ٥-٣ ويسمى أعلى الطية المحدبة بالقمة crest ، وأسفل الطية المقعرة بالقاع trough، ويسمى الخط المتوسط بين جناحي الطية والذي يمتد بطول القمة أو القاع بالمحور axis ، كما يسمى المستوى الذي ينصف الزاوية التي بين جناحي الطية بالمستوى المحوري للطية axial plane، وعندما يتآكل أعلى الطية المحدبة أو المقعرة بعوامل التعرية فإن الطبقات المكونة للطية تظهر على سطح الأرض على جانبي المستوى المحوري لها وتكرر نفسها على الجانبين ويكون ذلك دلالة على وجود الطية، وتعرف الطية المحدبة بوجود الطبقات الأقدم عند المركز محاطة بالطبقات الأحدث منها على الجانبين، بعكس الطية المقعرة فإن الطبقات الأحدث تظهر عند المركز وتتلوها على الجانبين الطبقات الأقدم منها.



شكل ٥-٣: الطية المحدبة والطية المقعرة.

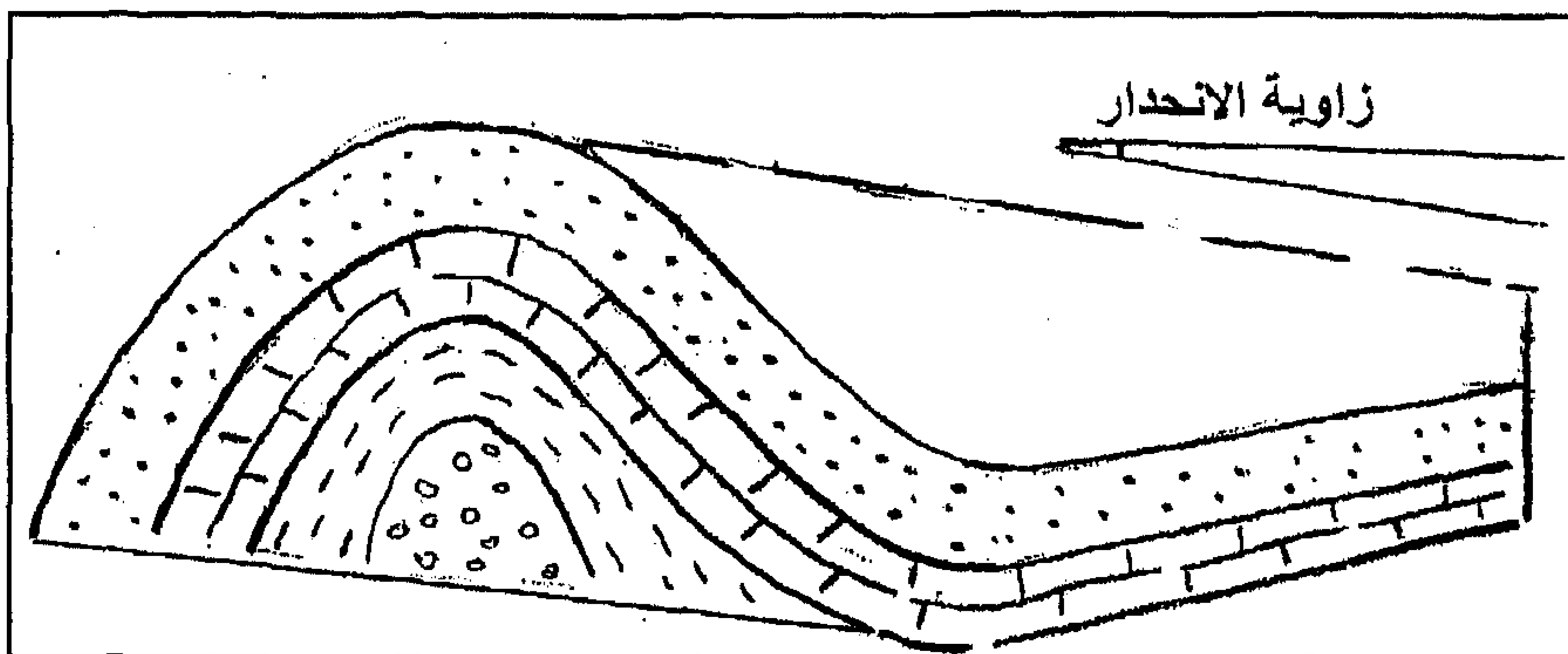
وتصنف الطيات على حسب ميل أجنحتها وأيضاً بالنسبة لوضع المستوى المحوري، ومن أمثلة هذه الطيات ما يلي:

- **الطية المحدبة المتماثلة symmetrical anticline**: وهي طية إلى أعلى، وفيها يتجه جناحا الطية إلى أسفل، ويكونان متباعدين وميلهما على الجانبين بالنسبة لمحور الطية على نفس الزاوية تقريبًا (شكل ٥-٤ يمين).
- **الطية المقعرة المتماثلة symmetrical syncline**: وهو طية إلى أسفل، وفيها يتجه جناحا الطية إلى أعلى، ويكونان متباعدين وميلهما على الجانبين بالنسبة لمجور الطية على نفس الزاوية تقريبا (شكل ٥-٤ يمين).
- **الطية غير المتماثلة asymmetrical fold**: سواء كانت طية محدبة أو مقعرة وميل جناحيها غير متساو، وبالتالي فإن المستوى المحوري يكون مائلا عن الوضع الرأسي (شكل ٥-٤ يسار).



شكل ٥-٤: الطية المتماثلة والطية غير المتماثلة.

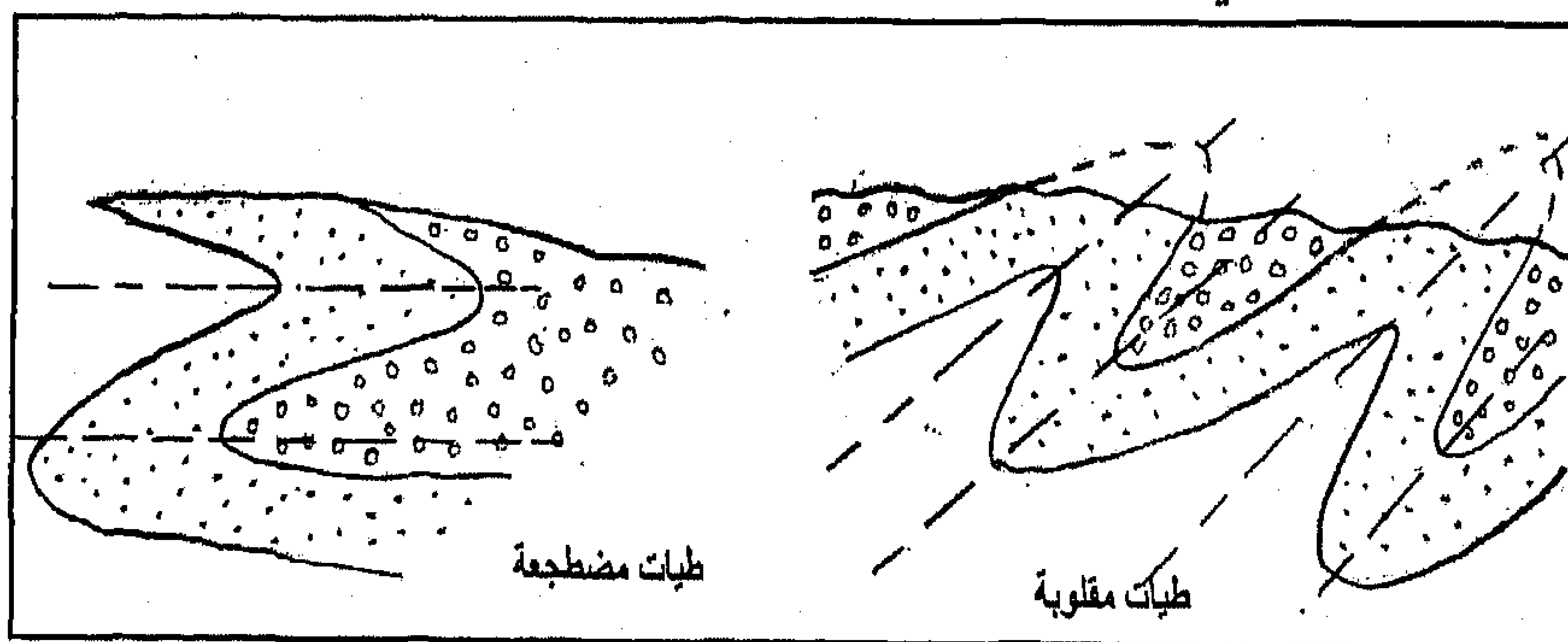
- الطية الغاطسة plunging fold: وهي طية محورها مائل عن الأفق من جانب واحد أو من جانبين، وتسمى الزاوية التي يصنعها خط المحور مع الأفق بزاوية الانحدار (شكل ٥-٥).



شكل ٥-٥: الطية الغاطسة.

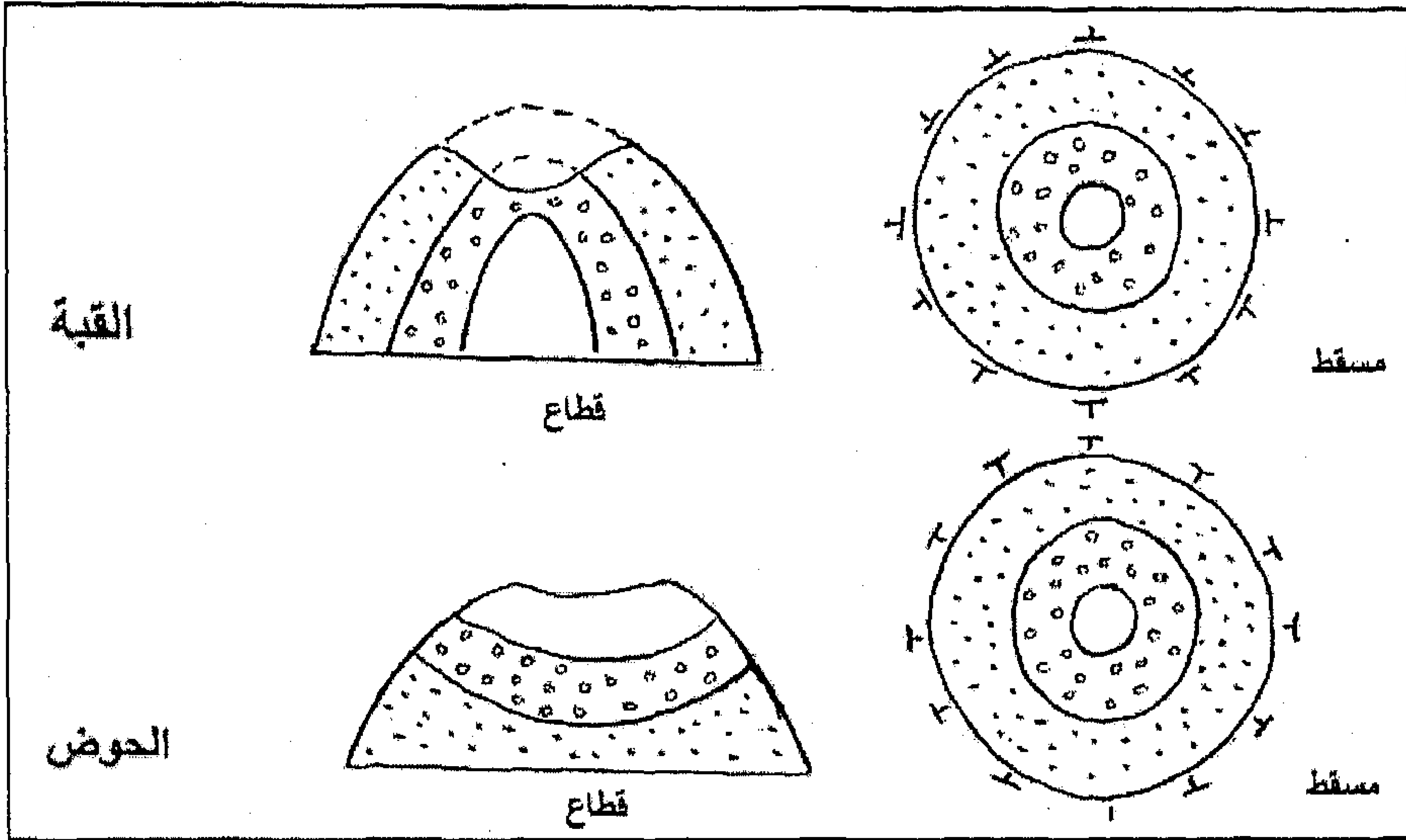
- الطية المقلوبة overturned fold: وهي تلك التي يزيد فيها مقدار عدم التماثل حتى يتخطى الميل في أحد جناحيها ٦٠ درجة،وفي هذه الحالة يكون المستوى المحوري مائلا على أحد جناحي الطية تحت الجناح الآخر جزئياً (شكل ٥-٦ يمين).

- الطية المضطجعة recumbent fold: وهذه تمثل أقصى حالات الانقلاب في الطيات عندما يكون جناحا الطية مائلين في نفس الاتجاه، والمستوى المحوري على درجة كبيرة من الميل حتى أن جناحي الطية يكونان تقريبا متوازيين واحد منها فوق الآخر وتدل الطيات المضطجعة على ما تعرضت له الطبقات من ضغط جانبي شديد للغاية (شكل ٥-٦ يسار).



شكل ٥-٦: الطية المقلوبة والطية المضطجعة.

- **القبة dome:** وهي تركيب تميل فيه الطبقات من جميع الاتجاهات بعيداً عن نقطة متوسطة تسمى مركز القبة، وفي المسقط الرأسي تظهر الطبقات المكونة للقبة على هيئة دوائر داخل بعضها تكون أقدمها في الداخل ومحاطة من كل الجوانب بالطيات الأحدث في العمر (شكل ٥-٧ أعلى)، ومن أشهر القباب في مصر قبة الحسنة بمنطقة أبو رواش غرب القاهرة.



شكل ٥-٧: القبة والحوض.

- **الحوض basin:** وهو الطية التي تميل فيها الطبقات إلى الداخل في جميع الاتجاهات نحو نقطة متوسطة تسمى مركز الحوض، وفي المسقط الرأسي تظهر الطبقات الحديثة في العمر بالداخل محاطة من الخارج بالطبقات الأقدم منها كما هو مبين في الشكل ٥-٧ أسفل.

- **الطيات المركبة:** وهذه طيات تتكون من عدة ثنيات أو تجعدات قد تكون من نوع واحد أو من عدة أنواع (شكل ٥-٨)، وإذا كان الاتجاه أو التركيب العام للطية المركبة composite fold من النوع المحدب تسمى طية محدبة مركبة، أما إذا كان اتجاهها العام مقعرا فتسمى طية مقعرة مركبة. وكثيرا ما تكون الطيات المركبة ذات اتساع عظيم وامتداد إقليمي بحيث تشمل أقطاراً برمتها، وتسمى الطيات العليا من هذا النوع بالتحدبات الكبرى geanticlines وأحيانا تسمى

بالتحدبات والتقعرات الإقليمية على الترتيب regional anticlines and synclines وتصل أبعاد الطيات العظمي أو الإقليمية إلى مئات الكيلومترات وقد كانت التقعرات العظمي في الماضي أحواضا عظيمة تتراكم فيها الرسوبيات لملايين السنين ثم تتناولها الحركات الأرضية فتعلو بها فوق سطح البحر في هيئة سلاسل من الجبال ومن أمثلتها الآن جبال الألب



شكل ٥-٨: مجموعة من الطيات المركبة (محدبة ومقعرة).

(٢) الصدوع:

الصدوع faults هي كسور أو فواصل في مجموعة من الصخور يصاحبها انزلاق أو حركة للصخور على جانب واحد منها على الأقل بحيث تزاح الصخور في ذلك الجانب بالنسبة لمثيلاتها في الجانب الآخر منها، ويتراوح مقدار الإزاحة displacement أو الحركة في تكون الصدوع من بضعة سنتيمترات إلى مئات الأمتار، وتحدث الحركة الناشئة من تكون الصدوع فجأة أحيانا وعلى فترات متلاحقة وأحياناً تحدث في بطء شديد بحيث لا يشعر بها الإنسان، وتعتبر الحركات المفاجئة نتيجة تكون الصدوع من الأسباب الرئيسة في حدوث الزلازل، أما الحركات البطيئة فتكون عادة على نطاق واسع وتستغرق أزمنة طويلة وتعد من العوامل المهمة في تكوين الصدوع الكبيرة وتشويه القشرة الأرضية.

ولأهمية الصدوع في النشاط الاستكشافي نرى من المفيد تقديم المصطلحات الفنية الآتية والتي تساعد كثيراً في وصف تلك الصدوع والتعرف عليها وذلك من خلال الأشكال (٥-٩، ٥-١٠ و٥-١١).

- **خط الصدع** fault line: وهو خط تقاطع سطح الصدع على سطح الأرض.
- **الجدار أو الحائط المعلق** hanging wall: وهو الكتلة الصخرية التي تقع فوق سطح الصدع المائل.
- **الجدار أو الحائط السفلي** foot wall: وهو الكتلة الصخرية التي تقع تحت سطح الصدع المائل.
- **جانب المرمى السفلي** downthrown side: وهو الجانب الذي تهبط فيه كتل الصخور بالنسبة لنظائرها في الجانب الآخر من الصدع.
- **جانب المرمى العلوي** upthrown side: وهو الجانب الذي ترتفع فيه كتل الصخور بالنسبة لنظائرها في الجانب الآخر من الصدع.
- **ميل الصدع** dip of fault:وهو مقدار الزاوية التي يصنعها سطح الصدع مع المستوى الأفقي.
- **مهوى الصدع** hade of fault: وهو مقدار الزاوية التي يصنعها سطح الصدع مع المستوى الرأسي.
- **مضرب الصدع** strike of fault: وهو اتجاه الخط الناتج من تقاطع سطح الصدع مع المستوى الأفقي.
- **رمية الصدع** throw of fault: وهو مقدار التغير الرأسي في منسوب الصخور المتناظرة على جانبي الصدع.
- **الزحف الجانبي للصدع** heave of fault: وهو مقدار التغير الأفقي في وضع الطبقات، ويتوقف على درجة ميل الصدع، فالصدوع الرأسية لا يحدث فيها زحف جانبي، ويزداد مقدار الزحف مع زيادة ميل الصدع.

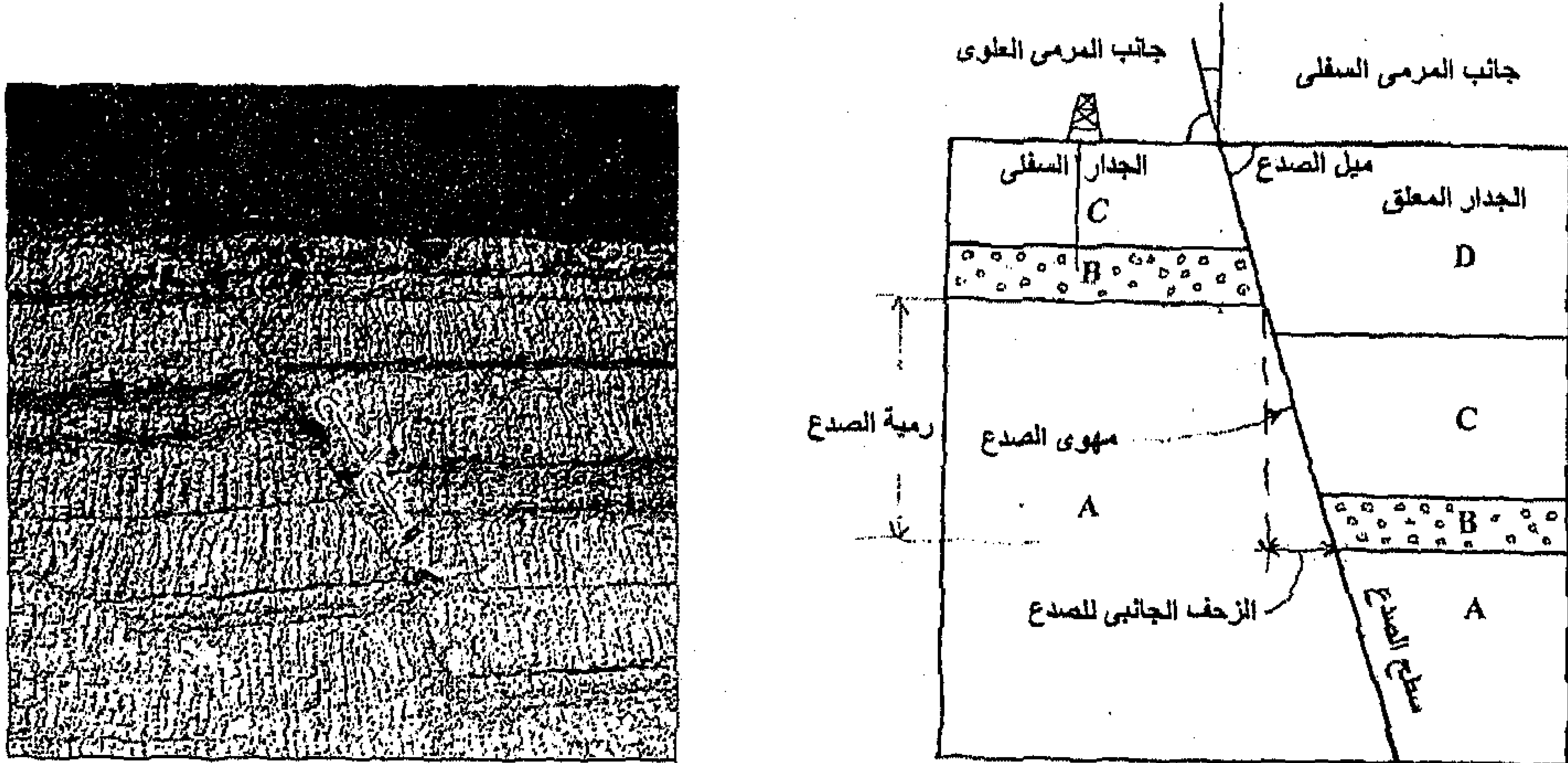
أنواع الصدوع:

هناك أنواع عديدة من الصدوع تتوقف أساساً على الحركة المسببة لها إذا ما كانت شداً أو ضغطاً وعلى علاقة اتجاه الصدع أو مضربه باتجاه الطبقات التي يمر بها.

ومن أهم أنواع الصدوع مايلي:

١- الصدع العادي:

وينتج هذا الصدع من حركات الشد والانزلاق وتكون فيه الرمية في اتجاه ميل الصدع (شكل ٥-٩)، ويلاحظ أن تأثير الصدع العادي normal fault هو ازدياد طول المسافة الأفقية التي كانت تغطيها الطبقة أصلا، وحيث ينزلق الجدار المعلق إلى أسفل بالنسبة للجدار السفلي كما هو موضح بالشكل، وجدير بالذكر أنه في حالة الصدع العادي أنه إذا ما حفرنا بئراً في موقع يمر به الصدع فإن هذه البئر سوف لا تمر بكل الطبقات ولكن يبقى هناك جزء مفقود lost section بسبب تلك الإزاحة الجانبية.

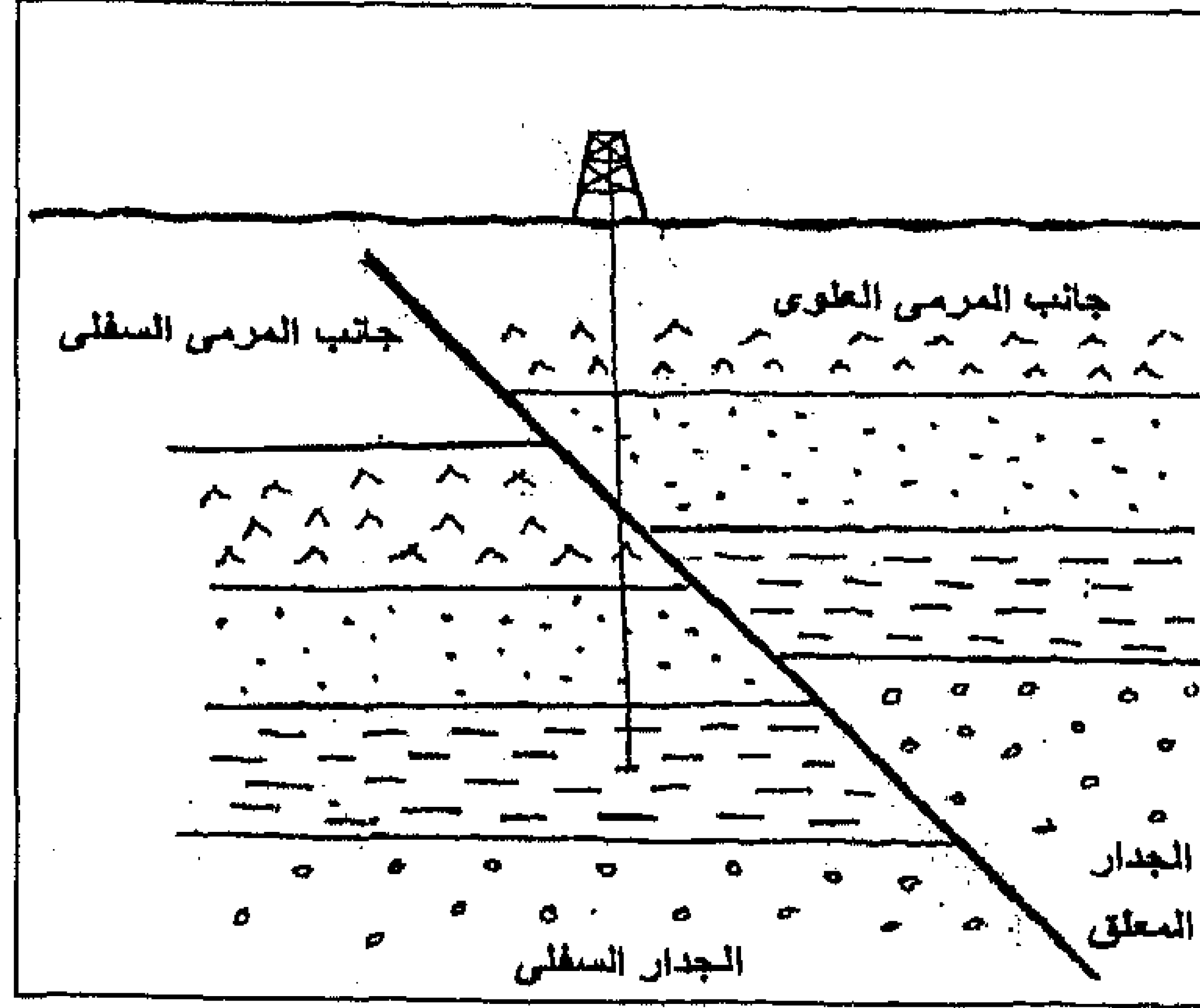


شكل ٥-٩: عناصر الصدع العادي.

٢- الصدع المعكوس:

وينتج هذا الصدع المعكوس reverse fault من حركات الضغط الجانبي وفيه تكون الرمية في اتجاه مضاد لميل الصدع وفي هذه الحالة يتحرك الجدار المعلق إلى أعلى بالنسبة للجدار السفلي وينتج عن ذلك قصر في طول المسافة الأفقية التي كانت تغطيها الطبقات،

وبالتالي فإنه عند حفر بئر ما في موقع الصدع فإن هذه البئر – على عكس الحال في الصدع العادي – من المحتمل أن تمر خلال كل الطبقات المار بها الصدع مرتين في مقطع مزدوج double section وتبدو الطبقات أنها قد تضاعفت في سمكها (شكل ٥-١٠).



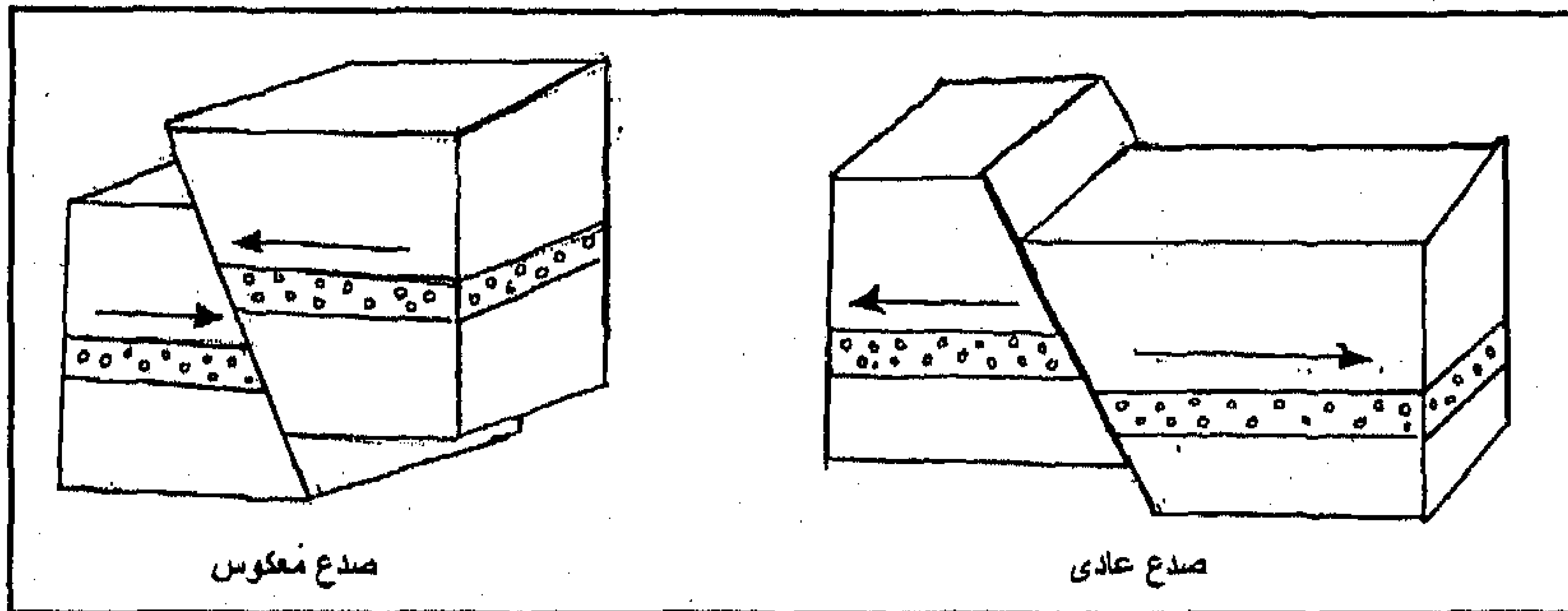
شكل ٥-١٠: الصدع المعكوس.

٣-الصدع الدسر:

الصدع الدسر thrust fault هو صدع معكوس يميل مستواه بزاوية أقل من ٤٥° ويبدو جداره المعلق وكأنه يتحرك إلى أعلى، وينشأ هذا الصدع من تضاغط أفقي وليس عن إزاحة رأسية، وفي فترات متعددة لبناء جبال تحركت كتل من صخور صدوع الدسر مئات من الكيلومترات فوق الصخور الصلدة.

٤- صدوع الميل:

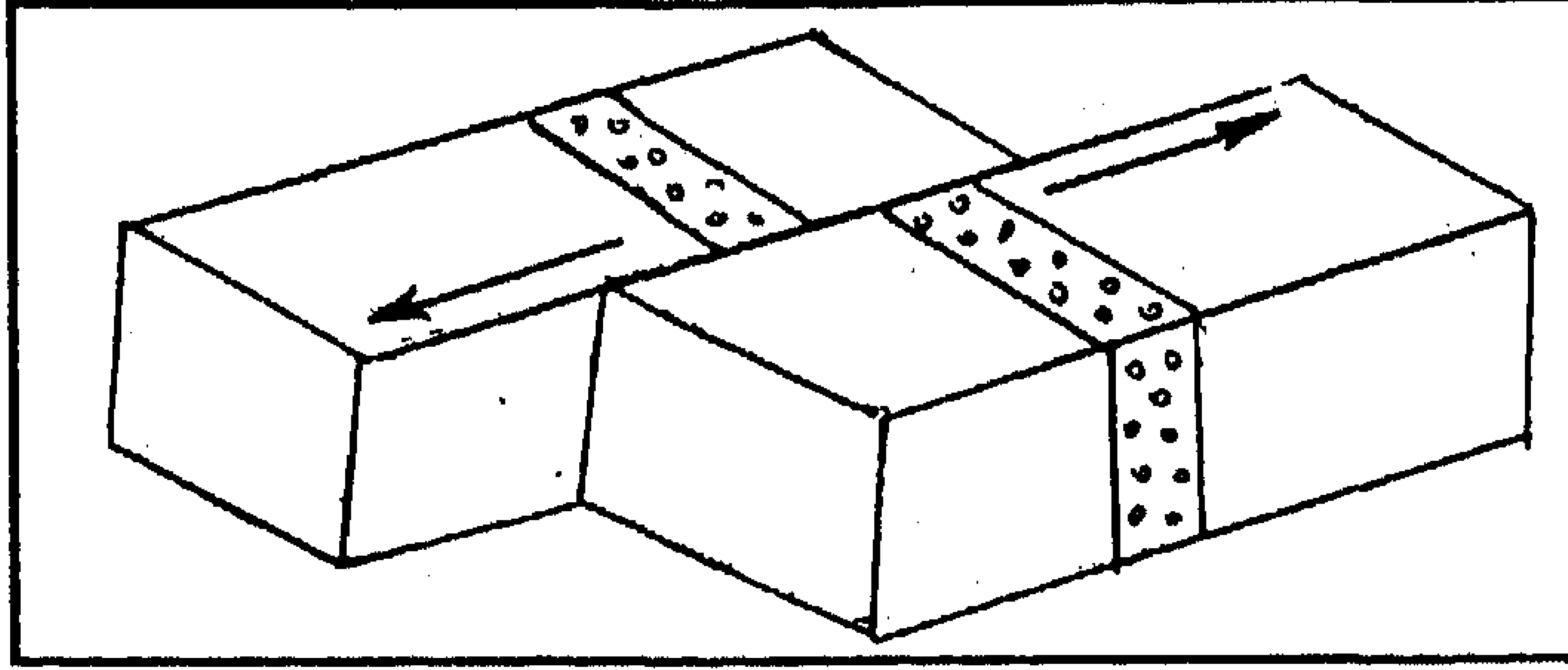
صدوع الميل dip-slip faults هي الصدوع العادية التي يجري فيها مضرب الصدع موازياً لميل الطبقات أو عمودياً على مضربها (شكل ٥-١١).



شكل ٥-١١: صدع الميل.

٥- صدوع المضرب:

صدوع المضرب strike-slip faults هي الصدوع العادية التي يجري فيها مضرب الصدع موازياً لمضرب الطبقات أو عمودياً على اتجاه الميل فيها (شكل ٥-١٢).



شكل ٥-١٢: صدع المضرب.

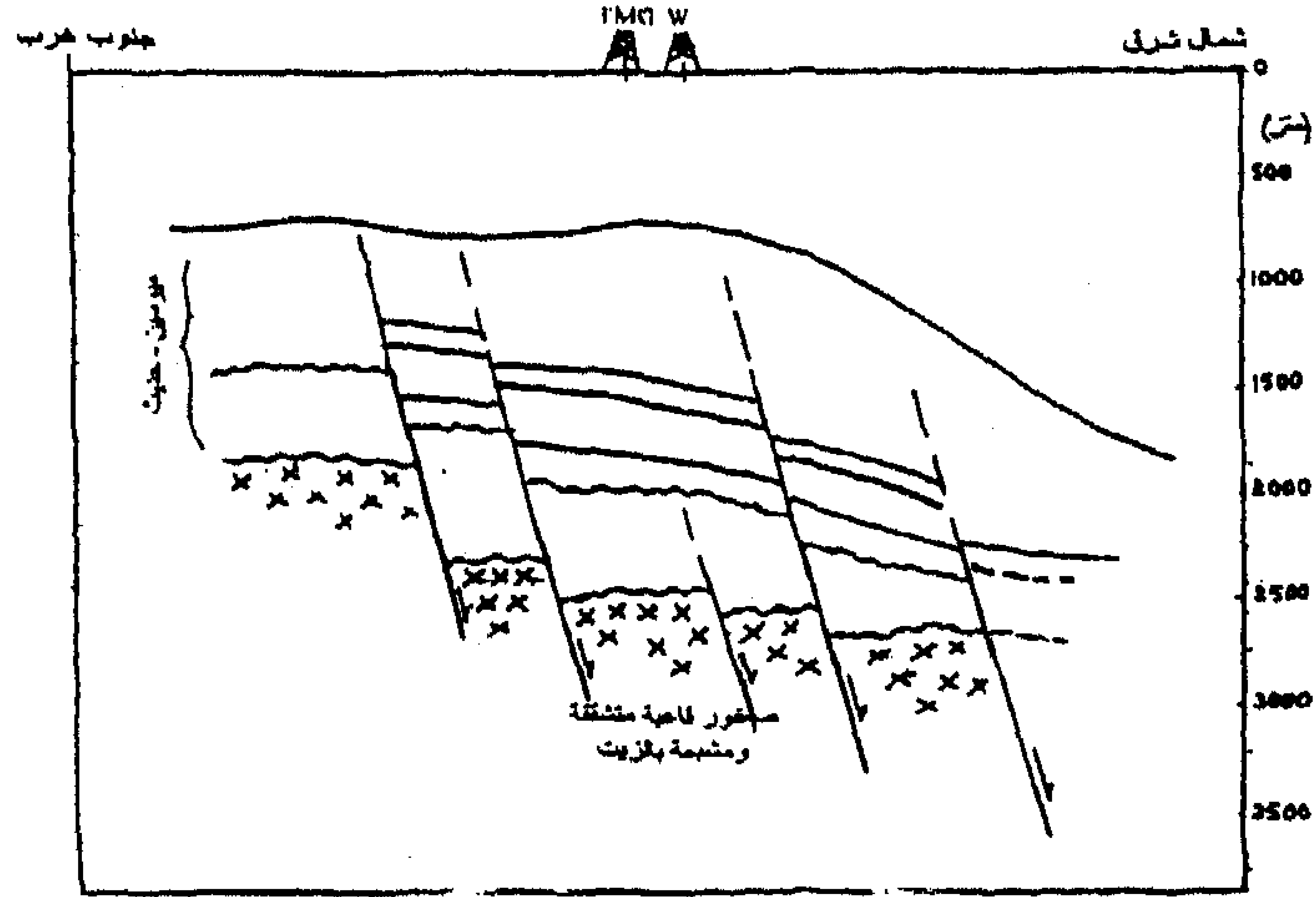
٦- الصدوع المدرجة:

الصدوع المُدرَّجة step faults هي مجمّوعات متوازية متدرجة من الصدوع تشبه السلم وتكون رمياتها في اتجاه واحد، والشكل ٥-١٣ يمثل قطاعاً جيولوجياً في حقل عش الملاحة البحري Esh El-Mallaha oil field بمنطقة خليج السويس ويلاحظ وجود عدد من الصدوع المدرجة وحيث عثر على البترول في صخور الميوسين من الحجر الرملي وكذا الصخور القاعية المتشققة.

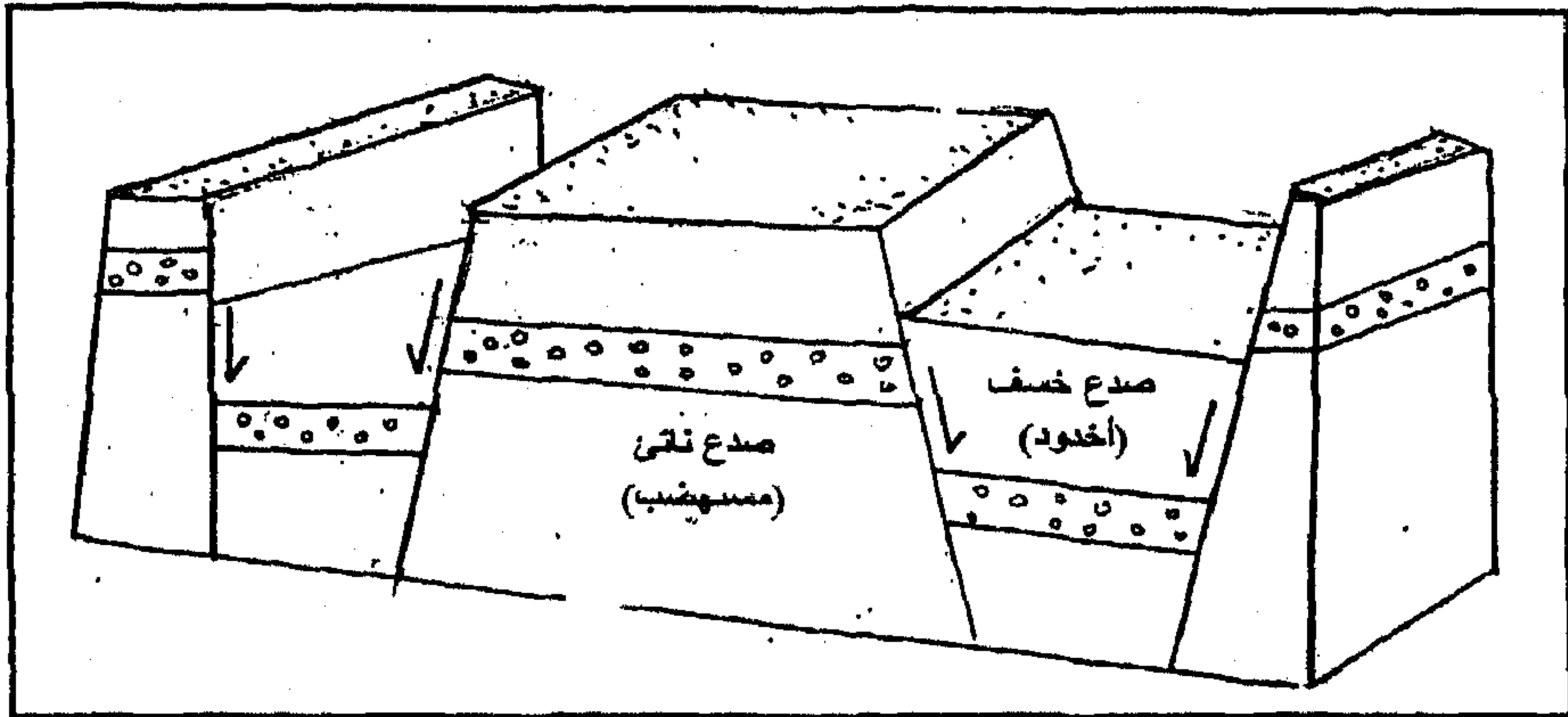
٧- الصدوع الناتئة:

الصدوع الناتئة horst faults هي مجموعات من الصدوع يرمي جزء منها في اتجاه ويرمي الجزء الآخر في الاتجاه المضاد فتتكون بذلك كتلة عالية من الطبقات على جانبيها كتل من نفس الطبقات على مستويات منخفضة (شكل ٥-١٤)، وتكون مثل تلك الصدوع تراكيب مناسبة جداً للتجمعات البترولية ومن أمثلتها الشهيرة معظم حقول البترول في منطقة خليج السويس بمصر، ويمكن أن نسوق كمثال في هذا الشأن حقل الغردقة Hurghada oil field على الشاطئ الغربي من البحر الأحمر، ويعتبر هذا الحقل من أقدم حقول البترول في مصر (شكل ٥-١٥) حيث تم اكتشافه عام ١٩١٣ ويأتي إنتاجه من صخور الميوسين من الحجر الدولوميتي (حمام فرعون) وصخور الكونجلومرات والحجر الجيري (نُخُل) وأيضاً من صخور ما قبل الميوسين من الحجر الرملي النوبي، وقد توقف

الإنتاج في الحقل عام ١٩٦٧ عند إنتاج تراكمي بلغ نحو ٤٢ مليون برميل من الزيت الخام إلا أنه مازالت هناك نشوع على السطح من خلال التسربات التحتسطحية بالمنطقة.



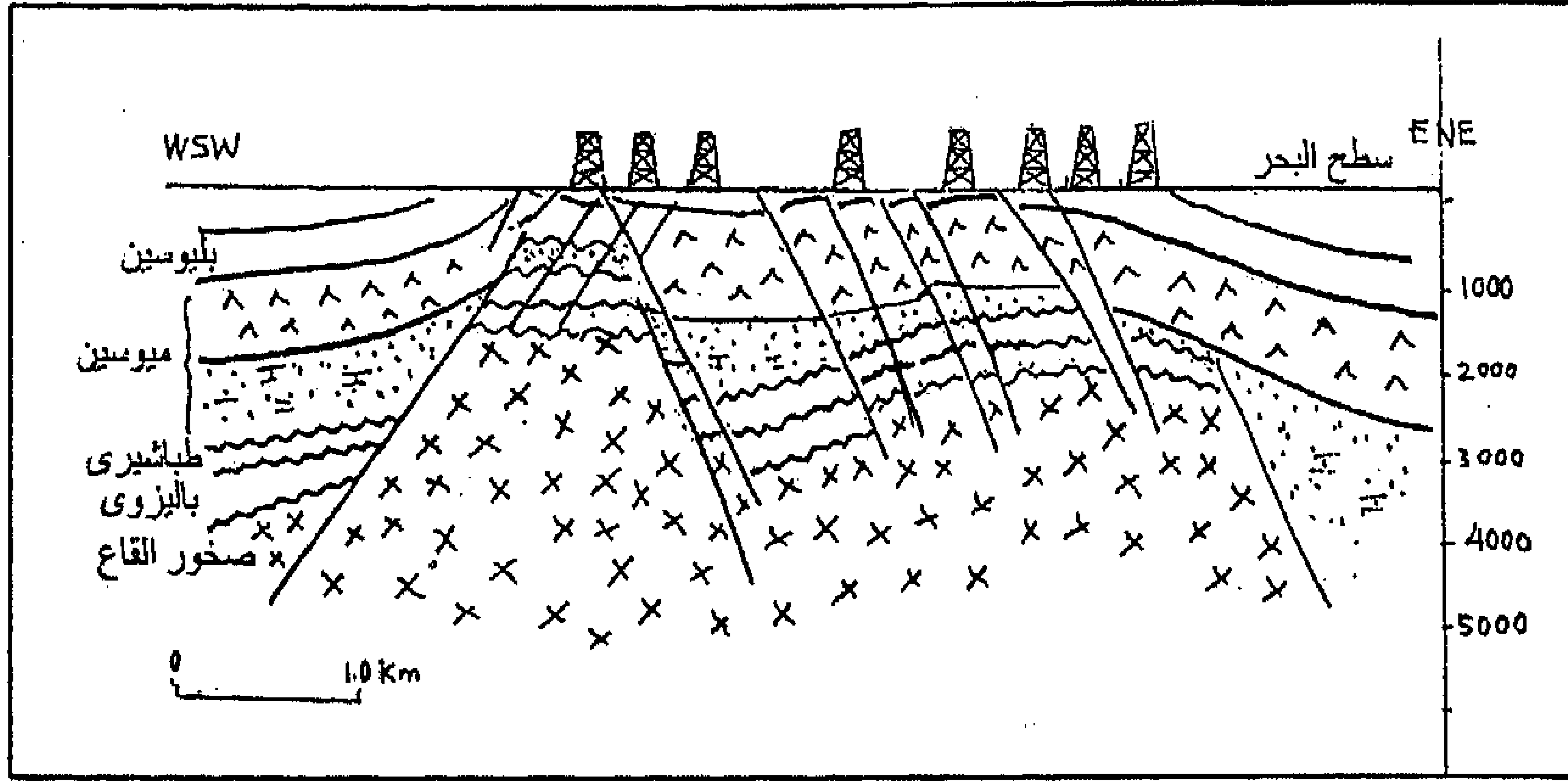
شكل ٥-١٣: قطاع في حقل عش الملاحة البحري حيث تلاحظ الصدوع المدرجة.



شكل ٥-١٤: الصدوع الناتئة والصدوع الخسيفة.

٨- الصدوع الخسيفة:

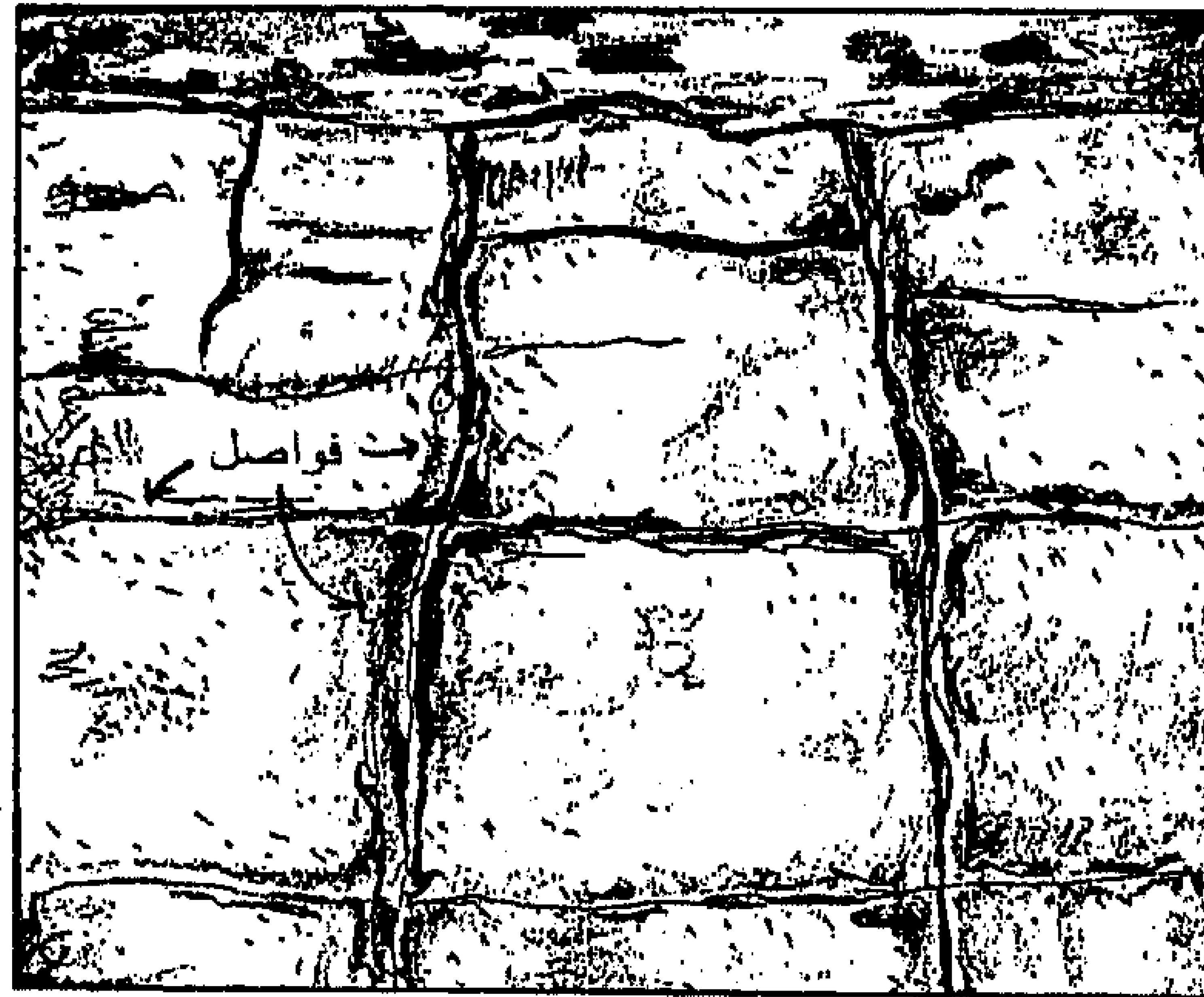
الصدوع الخسيفة الأخدودية graben faults وهي مجموعات من الصدوع ترمي مجموعة منها في اتجاه وترمي المجموعة الأخرى في نفس الاتجاه فيتسبب عن ذلك خفض الكتل الوسطى من الطبقات إلى أسفل بالنسبة للكتل الجانبية (شكل ٥-١٤)، ومن أشهر أمثلة الصدوع الخسيفة في العالم مجموعة صدوع الأخدود العظيم Great Rift Valley والذي أدى إلى تكوين بحيرات شرق أفريقيا والبحر الأحمر والبحر الميت.



شكل ٥-١٥: قطاع جيولوجي في حقل الغردقة بخليج السويس يبين الصدوع الناتئة بجانب الصدوع المدرجة.

الفواصل:

هي شقوق joints تكونت في الصخور دون أن يحدث نتيجة لتكونها أي انزلاق أو حركة على جانبي الشق، ولا يخلو عادة أي صخر متصلب من هذه الشقوق، وهي تتراوح في الاتساع من شقوق دقيقة إلى تصدعات هائلة ذات اتساع وامتداد كبيرين، وتوجد الفواصل في الصخور عادة على هيئة مجموعات كل مجموعة تشمل فواصل من نوع واحد، أي لها نفس الميل والاتجاه، وقد تكون الفواصل متقاربة أو متباعدة وعلى مسافات متساوية تقريبا ويؤدي ذلك إلى إنفصال الصخر في هيئة كتل كبيرة متشابهة في الحجم والشكل، وغالبا ما تكون الفواصل رأسية بسبب القوى المؤثرة عليها (شكل ٥-١٦).

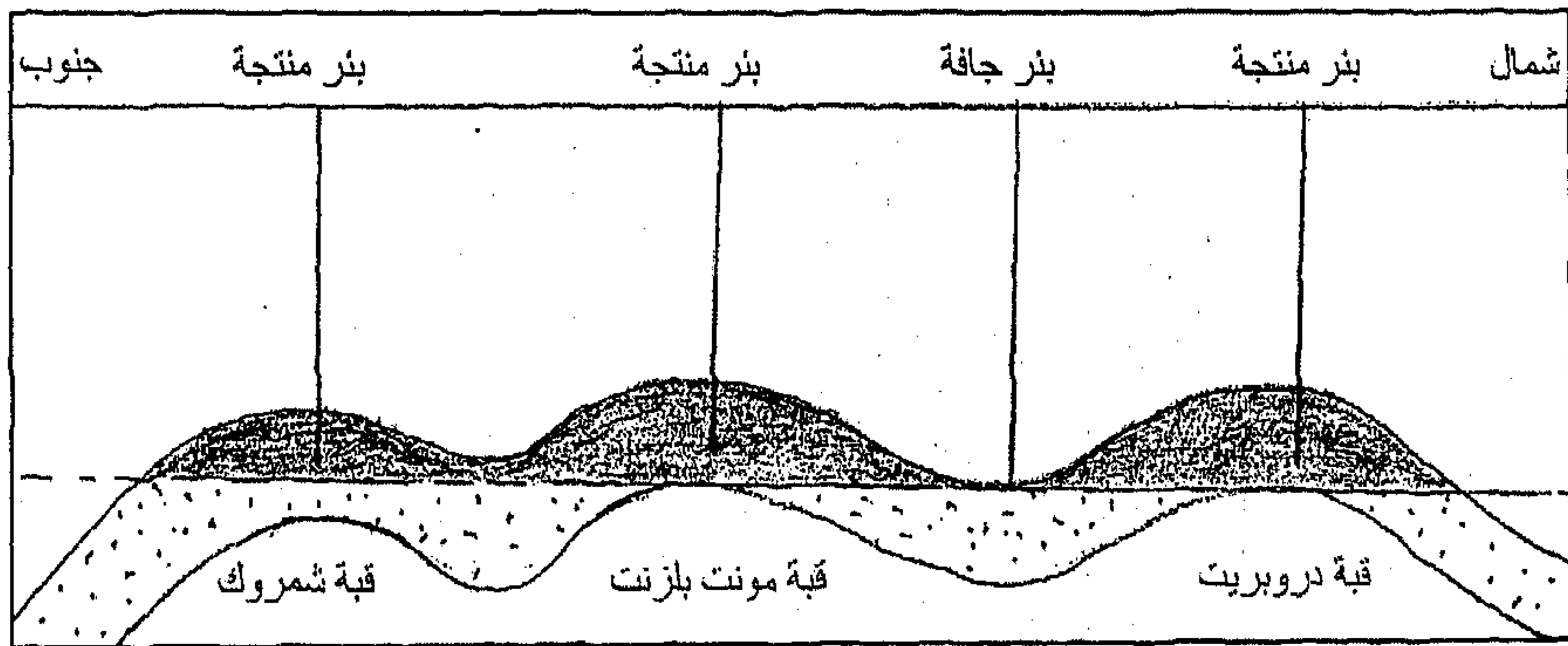


شكل ٥-١٦: وجود الفواصل في الصخور الرسوبية.

والفواصل إما تكون مغلقة أو مفتوحة، وتلعب الفواصل المفتوحة دوراً كبيراً في زيادة المسامية في الصخور غير المنفذة، وتحسين السعة التخزينية لها وقدرتها على إمرار وإنفاذ الموائع خلالها، كما قد تكون موطنا لترسيب المحاليل الحاملة للخامات، والفواصل تساعد أيضا على تسهيل عمليات التجوية والتعرية، وكثيرا ما تصاحب الفواصل الصدوع والطيات، وبالطبع فإن احتواء الصخر على هذه الفواصل أو الشقوق يرفع من احتماليتها كصخر ذي قدرة خزانية.

علاقة التراكيب الجيولوجية بالبترول:

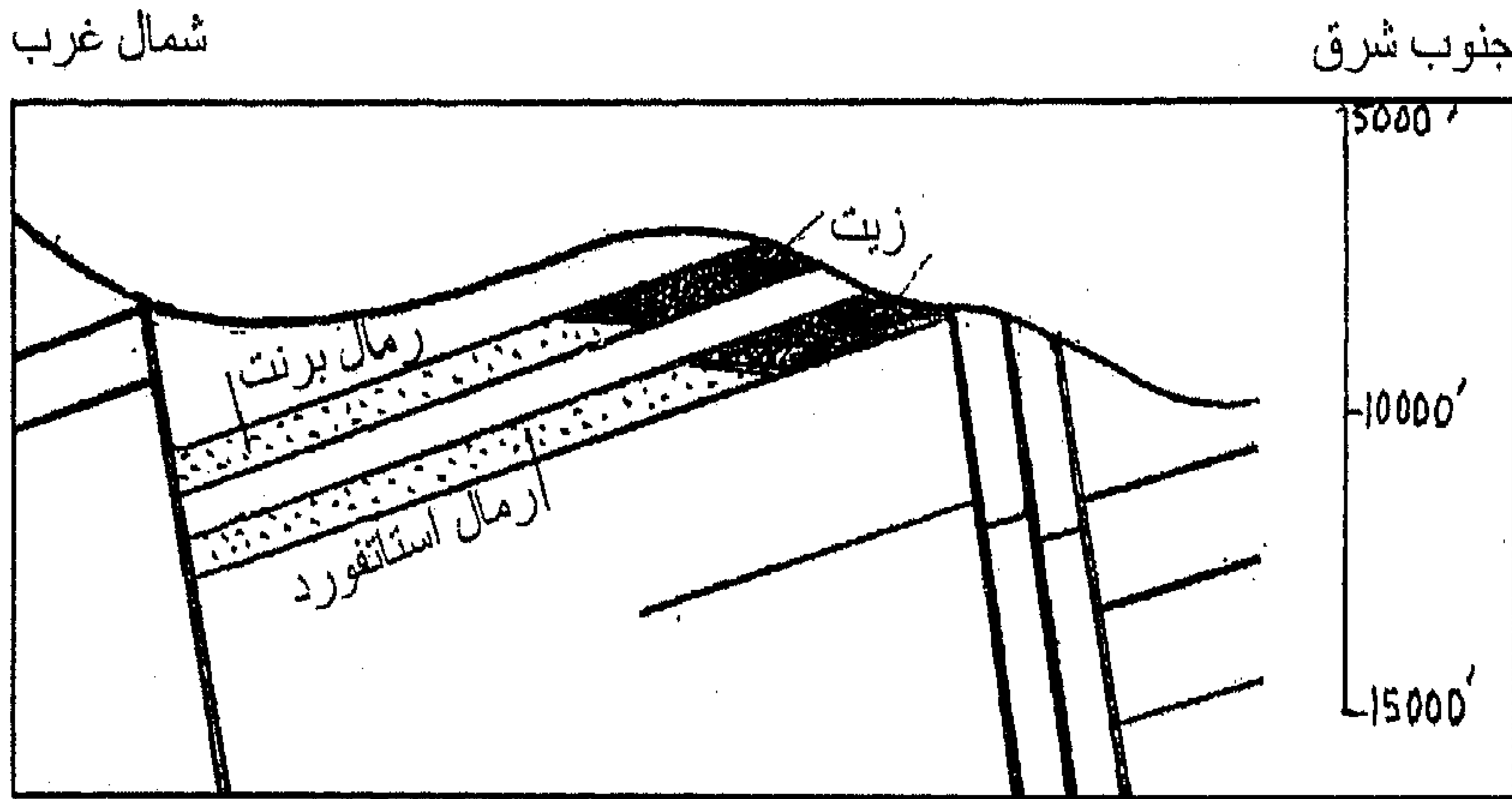
تشكل التراكيب الجيولوجية من طيات وصدوع مصائد جيدة للبترول وهو ما سوف نتناوله بالتفصيل في فصل قادم، وبالتالي فإن لها أهميتها البالغة بالنسبة لأعمال الاستكشاف والبحث والتنقيب عن البترول والغاز الطبيعي وهو ما تؤكده الاكتشافات التي تمت في أرجاء العالم المختلفة، ففي الشرق الاوسط شهدت المنطقة أول اكتشاف للبترول في البحرين عام ١٩٣٢ حيث عثر على الزيت الخام في تراكيب قبوية تحت سطح الأرض، كما تلى ذلك اكتشاف البترول بالسعودية عام ١٩٣٧ داخل تراكيب متشابهة، وإضافة إلى ذلك فإن أغلب حقول البترول العملاقة بالشرق الأوسط قد وجدت في الطيات المحدبة والقباب، ومن ناحية أخرى نرى أنه في الولايات المتحدة الأمريكية كان قد تم اكتشاف حقل كشينج Cushing oil field العملاق بولاية أوكلاهوما عام ١٩١٢ على هيئة ثلاث قباب متتالية (شكل ٥-١٧)، ومازال الحقل منتجاً حتى اليوم ويتوقع أن يصل انتاجه الإجمالي إلى حوالي ٤٥٠ مليون برميل من خزانات الحجر الرملي الموجودة به.



شكل ٥-١٧: قطاع جانبي في حقل كشينج البترولي ذي القباب الثلاث في أوكلاهوما.

كذلك فإن ثمة أمثلة كثيرة لتلك المصايد الناشئة عن الصدوع في العديد من البلدان، وفي مصر تتميز منطقة خليج السويس وكذا الصحراء الغربية بوجود العديد من حقول البترول التي ترتبط بالصدوع مثل حقول المرجان ورمضان وبلاعيم وبدر الدين وخالدة وغيرها.

وعلى المستوى العالمي هناك حقل استاتفورد Statfjord oil field الشهير بمنطقة بحر الشمال والذي تمتد حدوده بين المملكة المتحدة والنرويج، وقد تم اكتشافه في عام ١٩٧٤عن طريق المسح السيزمي، ويتكون التركيب الجيولوجي للحقل من كتلة صدعية مائلة، كما تتكون الصخور الخازنة من الحجر الرملي (برنت واستاتفورد) الذي يبلغ سمكه مئات الأمتار، وتعمل طبقات الطفل التي تعلو هذه الصخور كغطاء لمنع تسرب الزيت من الخزانات الجوفية (شكل ٥-١٨)، ويتوقع أن يبلغ إجمالي الإنتاج من هذا الحقل ثلاثة بلايين برميل من الزيت العالي الجودة (API ٣٩°) والمعروف بخام برنت القياسي benchmark oil.



شكل ٥-١٨ : قطاع جانبي في حقل استاتفورد ببحر الشمال على هيئة كتلة صدعية مائلة.

الفصل السادس

صخور الخزانات البترولية وبيئاتها الترسيبية

ليست جميع الصخور صالحة لاختزان البترول بداخلها حيث قد لا تتوافر لها تلك الصفات التي تؤهلها لهذا الغرض، ولكن من الملاحظ أن هناك نوعين شائعين من الصخور ذات القدرة الخزانية لما قد تمتلكه من مسامية ونفاذية لإمرار الموائع خلالها من بترول وغاز طبيعي وماء وهي صخور الحجر الرملي والصخور الكربوناتية التي تشمل الحجر الجيري والدولوميت، وبسبب التباين الكبير في نسيجها بالإضافة إلى ترسيبها في بيئات مختلفة يجعلها تتفاوت في خصائصها الخزانية فنجد منها الجيد والمتوسط والرديء، وفيما يلي شرح لأنواع الصخور الخزانية.

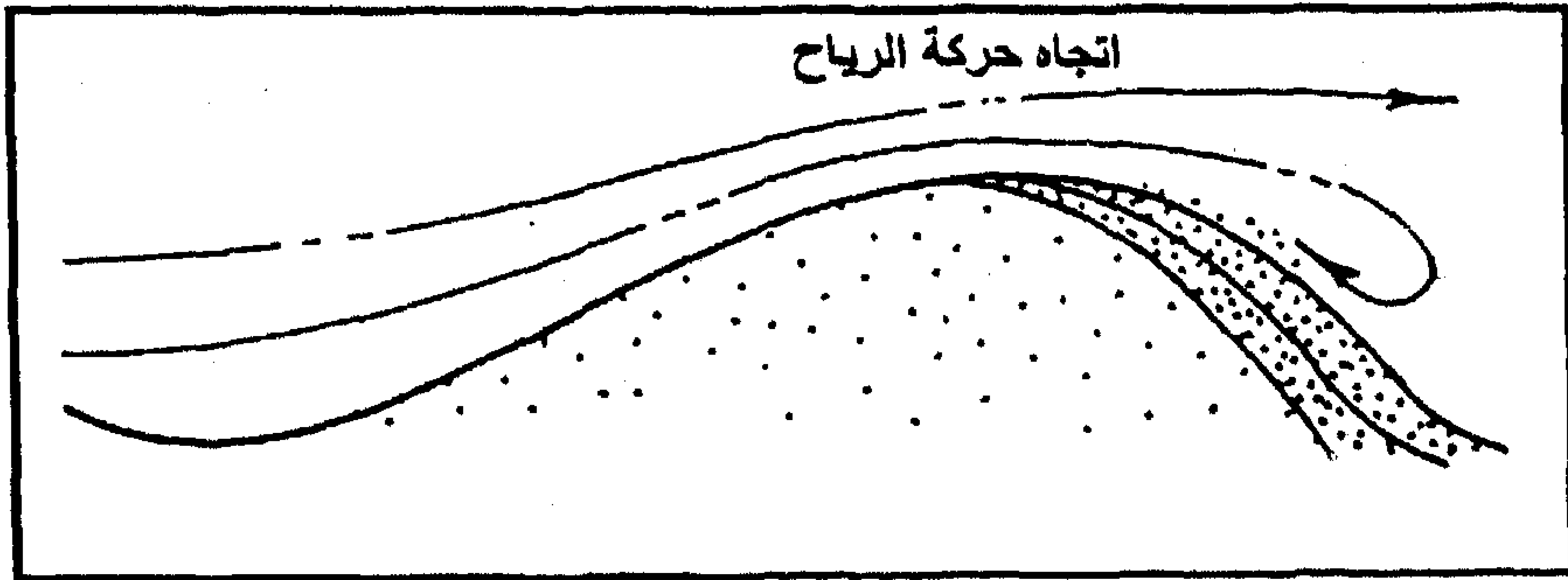
أولا: خزانات الحجر الرملي:

هناك أربعة أنواع رئيسة من الصخور الرملية التي يمكن أن تكون خزانات جيدة للبترول، وهي الكثبان الرملية والر واسب الشاطئية والرواسب النهرية والدلتات.

الكثبان الرملية:

هي تجمعات رملية رسبتها الرياح في البيئة الصحراوية أو الشاطئية، وتتكون الكثبان dunes في المناطق التي تتوافر فيها الرمال السائبة وتشتد فيها الرياح وتكون قادرة على تحريك هذه الرمال، ويبدأ تكوين الكثيب عندما يعترض الرياح المحملة بالرمال عائق صخري أو غيره (شكل ٦-١) فيتسبب في هبوط سرعة الرياح الأمر الذي يدفع الرياح إلى إلقاء حمولتها وتراكم الرمال على الجانب المدابر للعائق وباستخدام تراكم الرمال خلف العائق يزداد ترسيب الرمال لأن الرمال المتراكمة تصبح بدورها عائقا جديدا، وتستمر هذه العملية حتى يصل ارتفاع الكثيب إلى عدة أمتار، وقد يستمر الكثيب في نموه وارتفاعه ليصل إلى عشرات الأمتار، وللكثيب شكل مميز فله انحدار طويل ولطيف على الجانب المقابل للريح بينما يكون الانحدار شديداً وقصيراً على الجانب المدابر للريح، وبسبب حركة الرياح قد يلاحظ وجود تعرجات موجية الشكل على المسطحات الرملية عند المنحدر المقابل لاتجاه الريح، وهي ماتعرف بعلامات النيم ripple marks وتختلف هذه العلامات باختلاف حبيبات الرمل وقوة الريح، وإذا كانت الرمال على درجة عالية من تقارب أحجام الحبيبات فإن علامات النيم تكون ضيقة وتكون حركة الرمال بطيئة نسبياً.

والجدير بالذكر أن معظم الكثبان الرملية لا تستقر في أماكنها فهي تتقدم وتهاجر ببطء عندما تهب الرياح وتدفع الرمال إلى أعلى المنحدر اللطيف المواجه للريح، وتكرار هذه العملية يؤدي إلى حركة الكثيب الرملي في الاتجاه المدابر للريح، وتعرف هذه الحركة بهجرة الكثبان، هذا وتختلف الكثبان الرملية كثيراً في الشكل والحجم ويتوقف ذلك على سرعة واتجاه الرياح وكمية الرمال المتاحة في المنطقة.



شكل ٦-١: تكون الكثبان الرملية.

وبالنسبة لعلاقة الكثبان الرملية بالتواجدات البترولية فقد شكلت الكثبان القديمة منها عدداً من الخزانات الجوفية الجيدة في أنحاء متفرقة من العالم، وهناك على سبيل المثال تلك الحقول البترولية في منطقة بحر الشمال والذي يعتبر حقل جرونينجن Groningen gas field بهولاندا من أبرزها وهو أحد حقول الغاز العملاقة على المستوى العالمي والذي تم اكتشافه عام ١٩٥٩ ويقدر الاحتياطي من الغاز الطبيعي في هذا الحقل بأكثر من ١٠٠ تريليون قدم مكعبة، ويتكون الخزان الجوفي من طبقات الحجر الرملي Rotliegend Sandstone من العصر البرمي التي نشأت عن الكثبان الرملية والتي ردمت في زمن لاحق بالرواسب المختلفة وتغطي الجزء الجنوبي من بحر الشمال وكذلك أجزاء أخرى من المملكة المتحدة وأوروبا.

الرمال الشاطئية:

الرمال الشاطئية shoreline sandstones هي تراكمات من الرمال طويلة الامتداد وضيقة الاتساع وموازية للشاطئ، وقد ترسبت هذه الرمال عندما ألقت بها الأمواج والتيارات البحرية على الشريط الساحلي وعادة ما تكون جيدة الفرز ومتقاربة في حجم حبيباتها، أما الجسيمات الدقيقة من الغرين والصلصال فتعلق لبعض الوقت في الماء وتعود

بها الأمواج مرة أخرى بعيداً عن الشاطئ حيث تترسب في منطقة المياه العميقة، ونظراً لجودة فرزها فإن الرمال الشاطئية القديمة تشكل عدداً من خزانات البترول والغاز الطبيعي ولعل حقل بمبينا Pembina field خير دليل على ذلك وهو يعتبر أكبر الحقول في كندا وينتج من خزانات الرمال الشاطئية والكونجلومرات من العصر الكريتاوي (تكوين كارديوم Cardium Formation) ويقدر حجم المخزون الأصلي من البترول في هذا الحقل بـ ٧٫٥ بليون برميل من الزيت عالي الجودة (٣٧°) ويتوقع أن يبلغ الاحتياطي القابل للاستخراج نحو ١٫٧ بليون برميل ومن طبقة يبلغ متوسط سمكها الفعال نحو ٦ أمتار فقط ولكنها تغطي مساحة ٢٣٣٠ كيلومتراً مربعاً.

رمال الرواسب النهرية:

تنساب أغلب الأنهار وخاصة في مراحل كهولتها في منحنيات ومنعطفات ويحدث ذلك عندما تنخفض سرعة التيار في النهر إلى درجة كبيرة ويتحول نشاط النهر في مرحلة شبابه من النحر أسفل مجراه إلى التآكل الجانبي، وعندما يرتطم التيار في مساره نحو المصب بأحد الجوانب المحدبة منه يرتد بقوة نحو الجانب المقعر المواجه فينحت منه ثم يتجه بعد ذلك إلى الجانب الآخر في طريقه ناحية المصب، أما الجانب المحدب فتقل عنده سرعة التيار مما يؤدي إلى الترسيب فيزداد تحدبه للداخل،ومع تكرار هذه العملية تزداد الجوانب المقعرة تقعراً والجوانب المحدبة تحدباً، وتتكون سلسلة من الانحناءات والتعرجات تعرف بالمنعطفات النهرية river meanders، وكلما ازداد مجرى النهر تعرجاً كلما ضاقت الحواجز الأرضية بين طرفي كل منعطف لدرجة أنه يسهل على النهر في بعض الأحوال اقتحام هذه الحواجز تاركاً المنعطفات المقطوعة في هيئة بحيرات هلالية أو قوسية oxbow lakes على جوانبه (شكل ٦-٢). ويعتبر وجود المنعطفات النهرية والبحيرات الهلالية من علامات الكهولة في الأنهار، وبسبب ما يحدث لمجرى النهر من تعرية في جانب وترسيب في جانب آخر ينشأ عن ذلك رواسب رملية ذات فرز جيد داخل المنعطفات والبحيرات الهلالية، وبعد أن يهجر النهر منعطفه يبدأ ترسيب الطَّفل داخل هذا المجري، وغالباً ما تشكل الرواسب الرملية النهرية river sandstones خزانات جيدة للبترول، وهناك أمثلة حقلية كثيرة على ذلك، فحقل بوش سيتي Bush City بولاية كانساس الأمريكية ينتج البترول من الحجر الرملي النهري من العصر الكربوني

الذي يوجد عند عمق ضحل للغاية (١٨٠ متراً تحت سطح البحر) وبسمك حوالي ١٥ متراً ويمتد هذا الخزان إلى مسافة ٢١ كيلومتراً بعرض نصف كيلو متر (شكل ٦-٣).

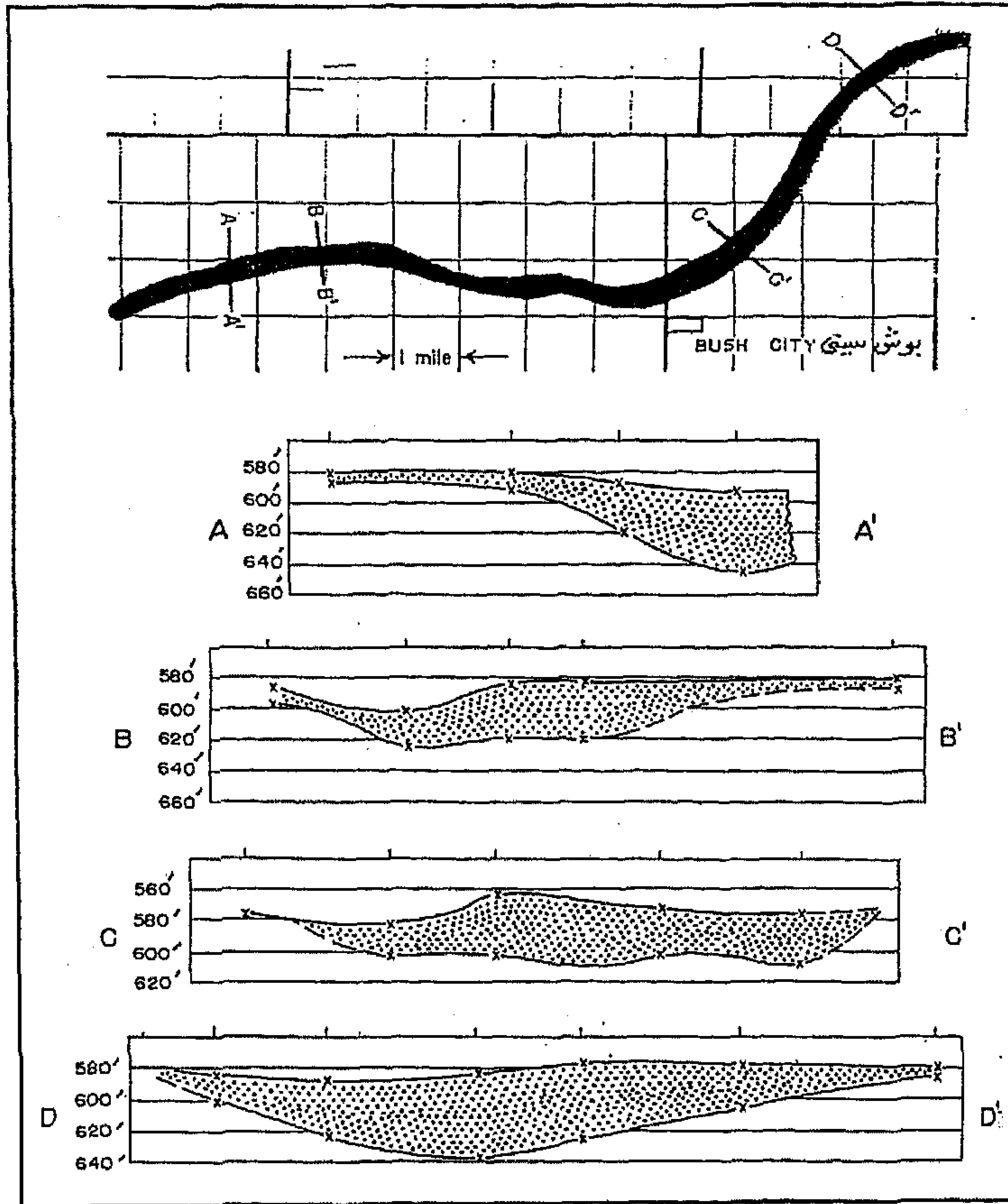
كذلك هناك نوع من الرواسب النهرية يطلق عليه الأنهار المجدولة braided rivers ويتميز النهر المجدول بوجود سلسلة معقدة ومتداخلة من الأفرع التي تتصل بعضها ببعض ثم تتفرق مرة أخرى وهكذا (شكل ٦-٤)، وتمتلئ هذه الشبيكة من الأفرع بالعديد من الحواجز الرملية sand bars وهي تجمعات رملية ترسبت من حمولة النهر الزائدة، وقد تشكل هذه التجمعات خزانات جيدة للبترول والغاز إلا أنه يصعب الكشف عنها وتحديدها حيث يحتاج الأمر إلى دراسة متأنية وحفر المزيد من الآبار بالمنطقة.

الدلتات:

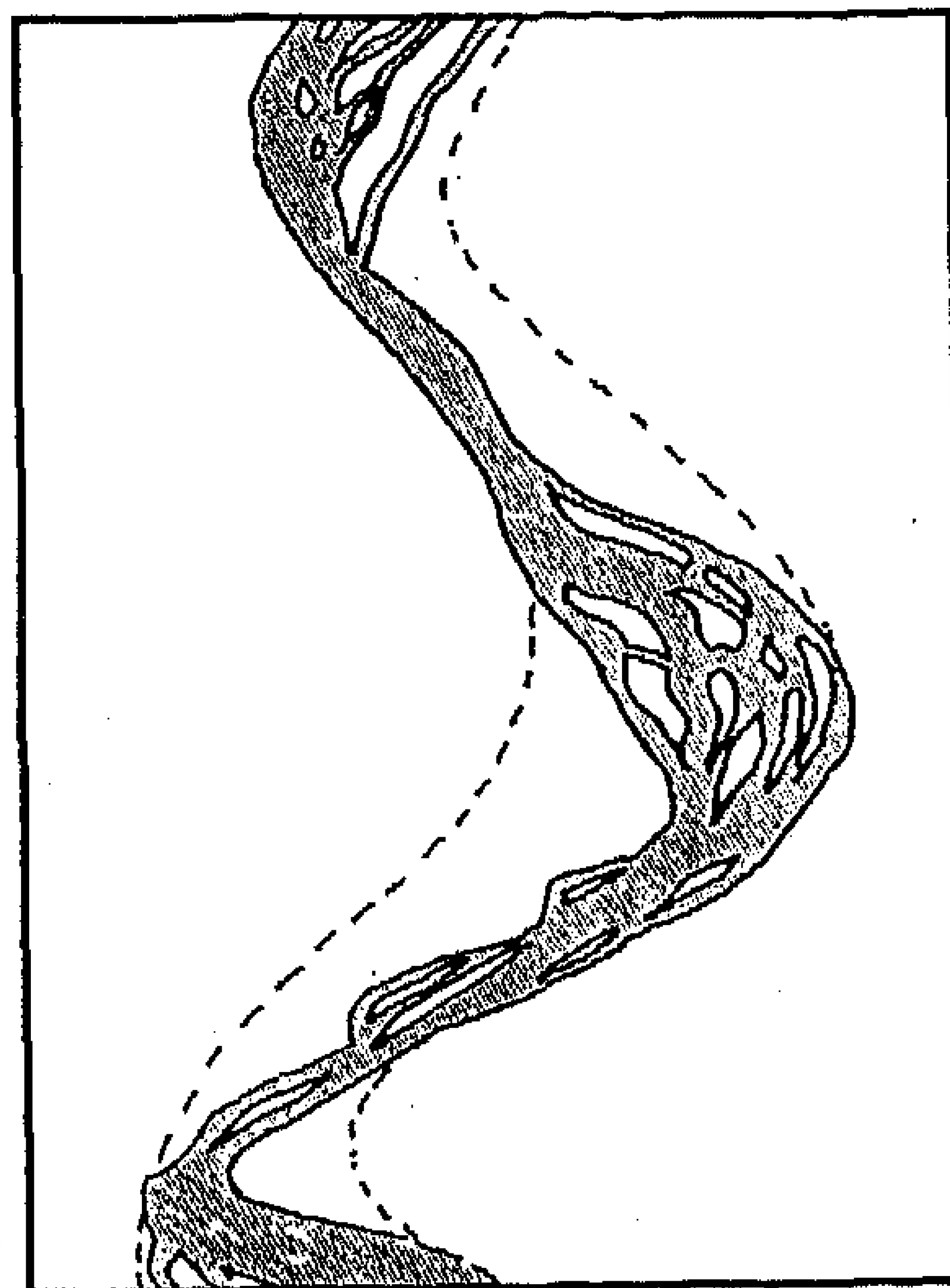
الدالة أو الدلتا delta هي نوع من الرواسب المستوية التي تتكون نتيجة لدخول النهر في حوض مائي مستقر مثل بحر أو بحيرة أو محيط فيفقد التيار قدرته على الحمل ويلقي كثيراً من حمولته من الرواسب، وهناك دلتا نهر المسيسبي التي تغطي مساحة تقدر بحوالي ٢٠ ألف كيلو مترمربع، وكذلك دلتا النيل التي تغطي نحو ١٨ ألف كيلو متر مربع (شكل ٦-٥)، وهي مناطق خصبة لما تحتويه من رواسب طمية.

المنعطفات النهرية	البحيرات القوسية	المعالم النهرية المتطورة
(أ) تعرية، ترسيب، ترسيب، تعرية	(ب) A: تعرية، ترسيب — B: نحو القطع — C: نقاط قطع — D: بحيرة قوسية	(ج) فى الطريق لتكون بحيرة قوسية، بحيرة قوسية، بحيرة قوسية

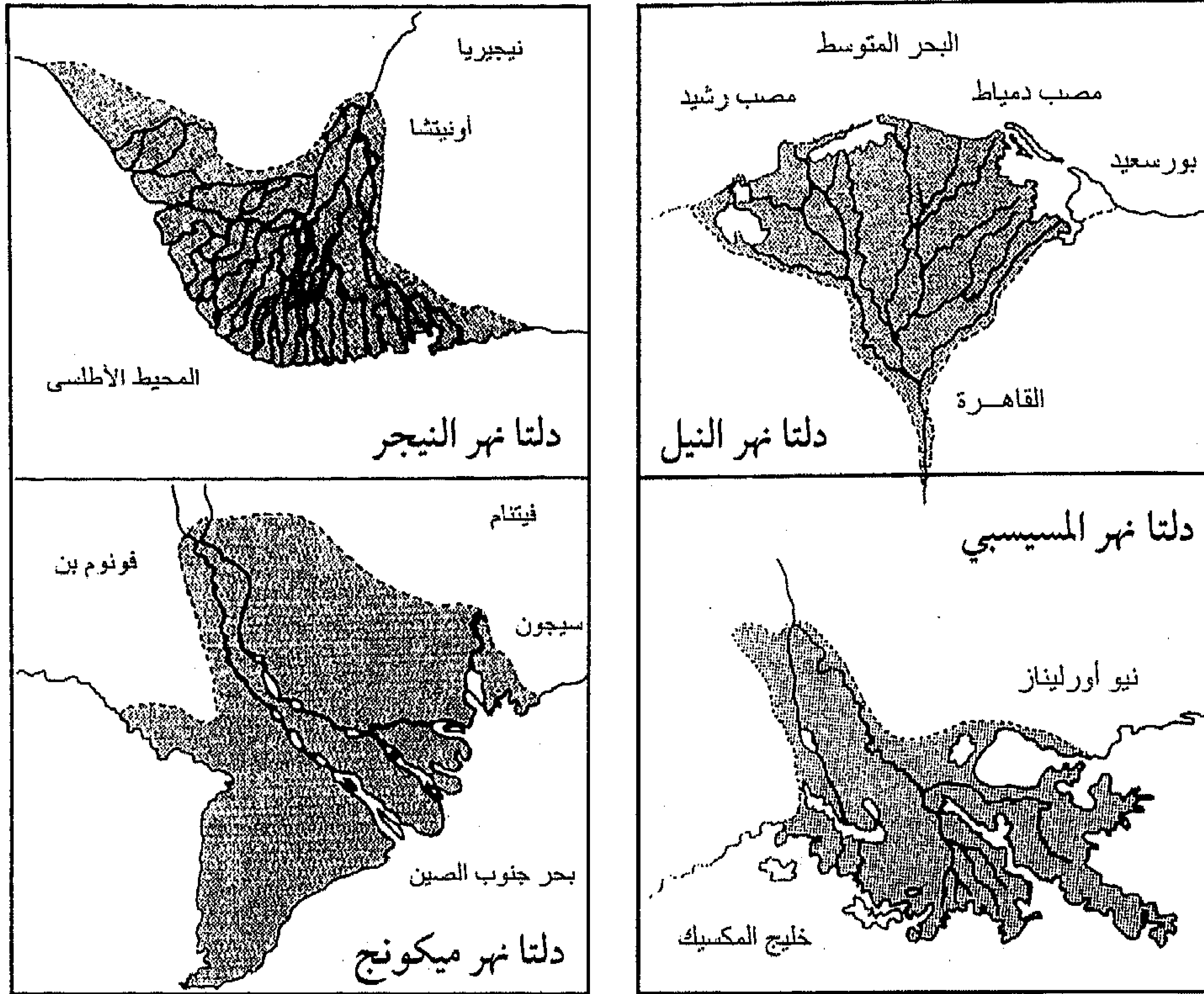
شكل ٦-٢: تطور المنعطفات النهرية والبحيرات القوسية والمعالم النهرية.



شكل ٦-٣: خريطة جانبية في حقل بوش سيتي بكانساس حيث يلاحظ النمط المتعرج والتزايد في سمك الرمل نحو المركز مما يدل على طبيعة نشأته النهرية.



شكل ٦-٤ : الأنهار المجدولة.

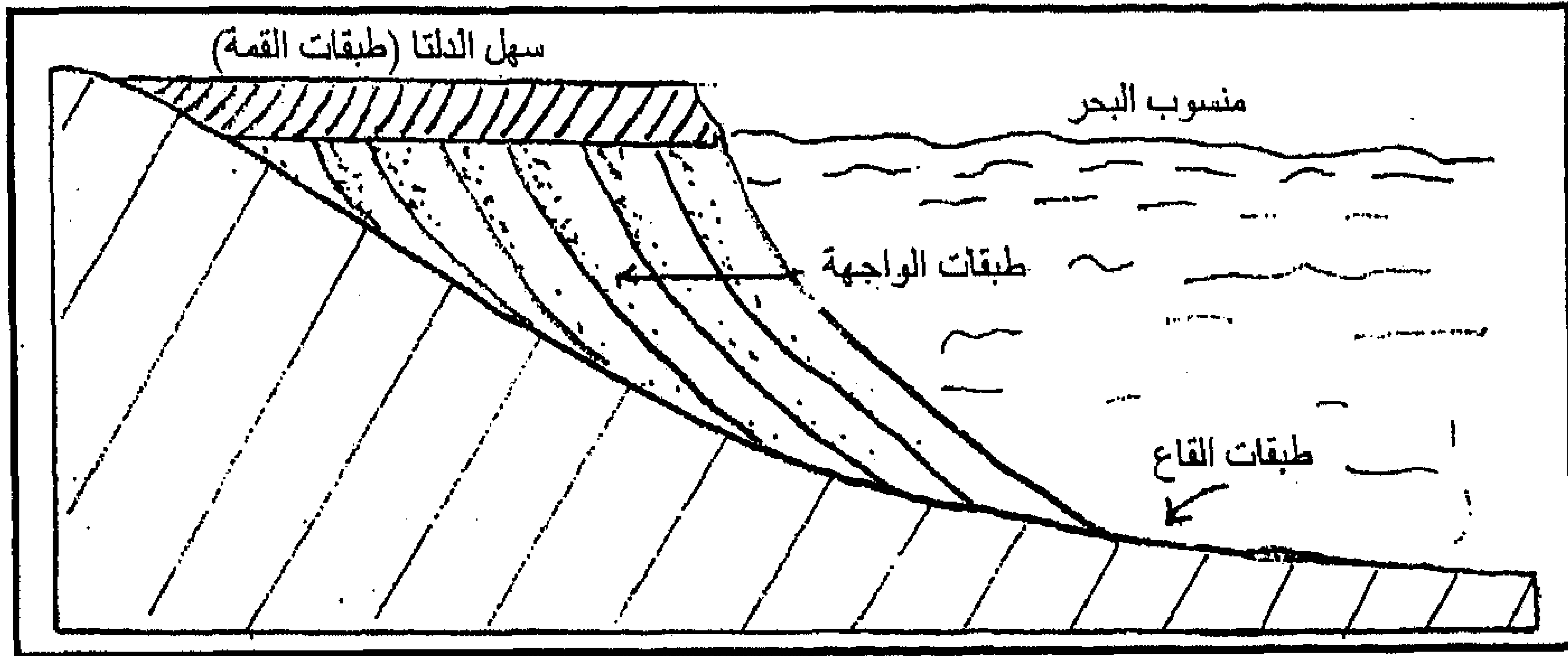


شكل ٦-٥: الدلتات الأربع (نهر النيل، نهر المسيسبي، نهر النيجر ونهر ميكونج).

وعندما تكبر الدلتا وتتسع فإن النهر الرئيس ينساب فوقها ليكوّن أفرع جديدة له distributaries وتأخذ الدلتا هيئة مروحية على قاع حافة الحوض المائي الذي يصب فيه النهر، وتجدر الإشارة إلى أنه ليست كل الأنهار لها دلتات إذ إن هناك ظروفاً خاصة تحكم ذلك وأهمها ألا تكون تيارات البحر الشاطئية على درجة من القوة بحيث يمكن حمل وإعادة توزيع الرواسب التي يفرشها النهر عند فوهته واتصاله بالبحر،كما أنه لكي تتكون الدلتا يجب ألا يكون النهر قد فقد كل حمولته أو الجزء الأكبر منها قبل اتصاله بالبحر أو الحوض المائي الذي يصب فيه، ويوضح الشكل ٦-٥ أمثلة للدلتات الحديثة لأنهار النيل والمسيسبي والنيجر وميكونج.

وبالنسبة لترتيب الرواسب التي تتكون بالدلتا يتعاظم حجم الحبيبات الخشنة قرب الشاطئ والحبيبات الناعمة في اتجاه البحر كما يكون ترتيب الرمال أولا يليها الغرين ثم الصلصال ويترتب على ذلك أن يتكون بناء خاص يميز الدلتا ويتكون من ثلاثة أجزاء

وهي: سهل الدلتا delta plain ويتكون من طبقات أفقية من الرمال والصلصال وواجهة الدلتا delta front وتتكون من طبقات مائلة من الصلصال والغرين وهي تنحدر من سهل الدلتا تجاه البحر، ثم الدلتا الأماميةprodelta والتي تتكون من الصلصال دقيق الحبيبات على الجزء قليل الانحدار من واجهة الدلتا تجاه البحر كما هو موضح بالشكل ٦-٦.



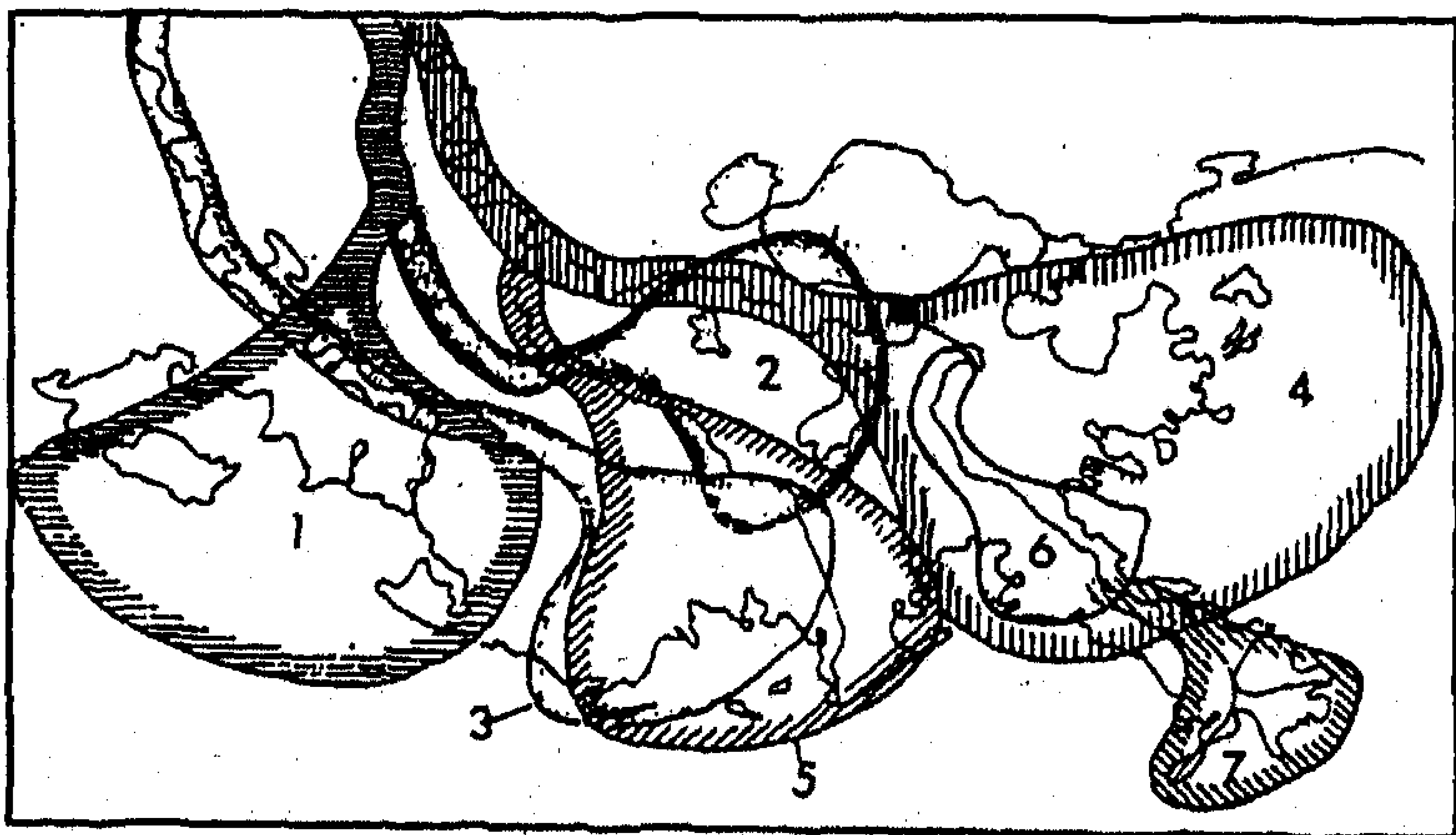
شكل ٦-٦: تكوين الدلتا.

ومع توالي حدوث الفيضان عاماً بعد عام تنمو الدلتا بحيث تترسب الرواسب الخشنة لسهل الدلتا فوق الرواسب دقيقة الحبيبات لواجهة الدلتا، كما تترسب رواسب واجهة الدلتا فوق الرواسب الأدق للدلتا الأمامية، وهذا يؤدي إلى أن تتكون تتابعات من الرواسب التي يزيد حجم حبيباتها كلما اتجهنا إلى أعلى. وتهيئ الدلتا ظروفاً جيدة لنشأة وتجمع البترول والغاز، فمياه النهر المندفعة إلى البحر تزخر بالعديد من الطحالب التي تتكون أساساً من مادة عضوية وعندما تترسب هذه الحمولة في قاع البحر أو المحيط يتكون الطين العضوي والذي يتحول إلى الطفل الأسود black shale أمام الدلتا، كما تعقب ذلك ترسبات جديدة تحتوي على الرمال الشاطئية والنهرية والتي تشكل صخوراً خزانية جيدة للبترول الآتي إليها من طبقات الطفل المصدرية له، وخلال الفيضانات المتعاقبة وبفعل عوامل التعرية والنحت يمكن أن يغير النهر مجراه إلى مجرى جديد وفروع أخرى، وتنشأ عن ذلك دلتا جديدة بجوار الدلتا القديمة التي تتعرض بدورها للهبوط بسبب تراكم الرواسب عليها بالإضافة إلى ما يحدث لسطح البحر من ارتفاع وانخفاض على مدى الأزمنة الجيولوجية المختلفة، وتعتبر دلتا نهر المسيسبي Mississippi River Delta بولاية لويزيانا الأمريكية مثالاً جيداً على ذلك، فقد أثبتت القياسات الإشعاعية باستخدام الكربون ١٤ المشع وجود ست دلتات قديمة بالمنطقة متداخلة ومتجاورة

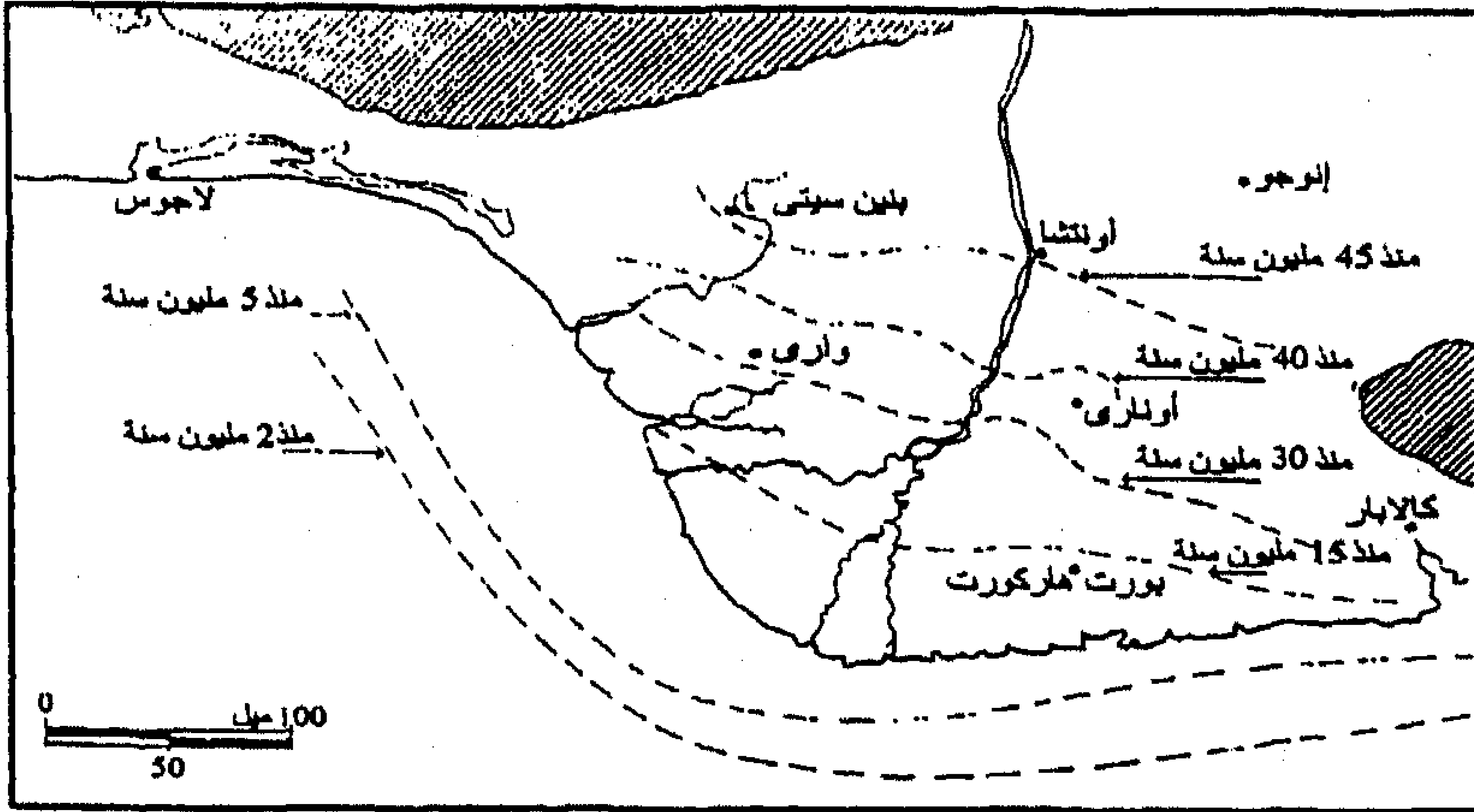
وذات أعمار متباينة خلال فترة زمنية جاوزت الـ ٥٠٠٠ عام (شكل ٦-٧) وإضافة إلى ذلك فإن النهر يعمل في الوقت الحاضر على بناء دلتا جديدة الأمر الذي سيدفع إلى هجرة النهر وتحوله إلى مسار جديد.

هذا ونشير إلى منطقة دلتا نهر المسيسبي تعتبر من المناطق الغنية بالبترول ويقدر حجم الإنتاج المتوقع منها بنحو ٢٢ بليون برميل من الزيت الخام، كما أن معظم حقول الزيت والغاز في خليج المكسيك يقع في المياه الضحلة جنوب غرب الدلتا الحديثة لنهر المسيسبي.

ومن الأمثلة الشهيرة للدلتات المعروفة بثرائها البترولي دلتا نهر النيجر Niger River Delta الواقعة في غرب أفريقيا، ويوضح الشكل رقم (٦-٨) مواقع الخطوط الشاطئية الحديثة والقديمة هناك، وقد ترسبت هذه الدلتا بسبب تقدم الخطوط الساحلية مع مرور الوقت، كما يلاحظ أيضاً أن الخطوط الساحلية القديمة والتي ترجع أعمارها ما بين ٢ إلى ٥ مليون سنة تتقدم في مواقعها إلى داخل المحيط الأطلنطي مقارنة بموقع الساحل الحالي نتيجة لتراجع مستوى سطح البحر، وتعتبر دلتا النيجر واحدة من أكبر المناطق إنتاجاً للبترول في العالم حيث يقدر الاحتياطي القابل للاستخراج منها بنحو 41 بليون برميل من الزيت الخام من طبقات الرمال النهرية والشاطئية القديمة، ومثال ثالث هو دلتا نهر النيل Nile River Delta والتي تحققت بها مؤخراً اكتشافات بترولية كبيرة من الزيت والغاز الطبيعي سواء كانت في البر أو في مياه البحر المتوسط، ويبدو أن الغاز الطبيعي بمصر سيحتل مكانة متميزة حيث إن الأكتشافات الحديثة تشير إلى وجود مخزون كبير من الغاز في دلتا النيل وشمال الدلتا البحرية.



شكل ٦-٧: تكون دلتا نهر المسيسبي خلال الخمسة آلاف سنة الأخيرة.



شكل ٦-٨: الخطوط الساحلية القديمة والحديثة لدلتا نهر النيجر.

ثانيا: خزانات الصخور الكربوناتية:

الحجر الجيري من الصخور الكربوناتية carbonate reservoirs الشائعة كخزانات للبترول وذلك من واقع السجل الجيولوجي وتعتبر كربونات الكالسيوم المكون الرئيس للحجر الجيري، وتنشأ هذه المادة من الإفرازات الحيوانية والنباتية للكائنات التي تزخر بها المحيطات، وتترسب أغلب الأحجار الجيرية عند قيعان البحار والتي كانت تغطي المعمورة على فترات زمنية متعاقبة على مدى العصور الجيولوجية الطويلة، وتتكون الصخور الكربوناتية من الحجر الجيري والدولوميت كما سبق أن ذكرنا.

الشعاب:

الشِّعب reef هو تركيب جيري صلب ومسامي، مقاوم للأمواج ويبنى على قاع البحر بتجميع مواد عضوية هيكلية خلفتها كائنات بحرية مثل الطحالب الجيرية والمراجين corals وغيرها، وتعد الشعاب المرجانية coral reefs الموجودة كحيود ridges في بعض المناطق الساحلية عاملاً مهماً في تكوين خطوط الشواطئ التي تشكلت بالترسيب البحري، وتعرف هذه الرواسب البحرية الجيرية بالرسوبيات الجيرية الشعابية bioherms وتتكون هذه الشعاب أساساً من تراكمات هائلة من الهياكل الجيرية للمراجين البانية للشعاب، وهذه الحيوانات الصغيرة توجد في البحر فقط وتعيش عادة في مستعمرات في المياه الصافية الدافئة (٢٠°C)عند أعماق ضحلة لا تتجاوز ٥٠ متراً، وتستخلص المراجين

كربونات الكالسيوم الذائبة في مياه البحر وتبني بها هياكلها، وهناك كثير من النباتات والحيوانات التي تفرز الكالسيوم وتعيش أيضاً في الشعاب، وعندما تموت هذه الكائنات الحية فإن بقاياها تضاف إلى الكتلة الجيرية وتنمو شعاب جديدة فوقها وبذلك تستمر الشعاب في نموها لمدد طويلة من الزمن.

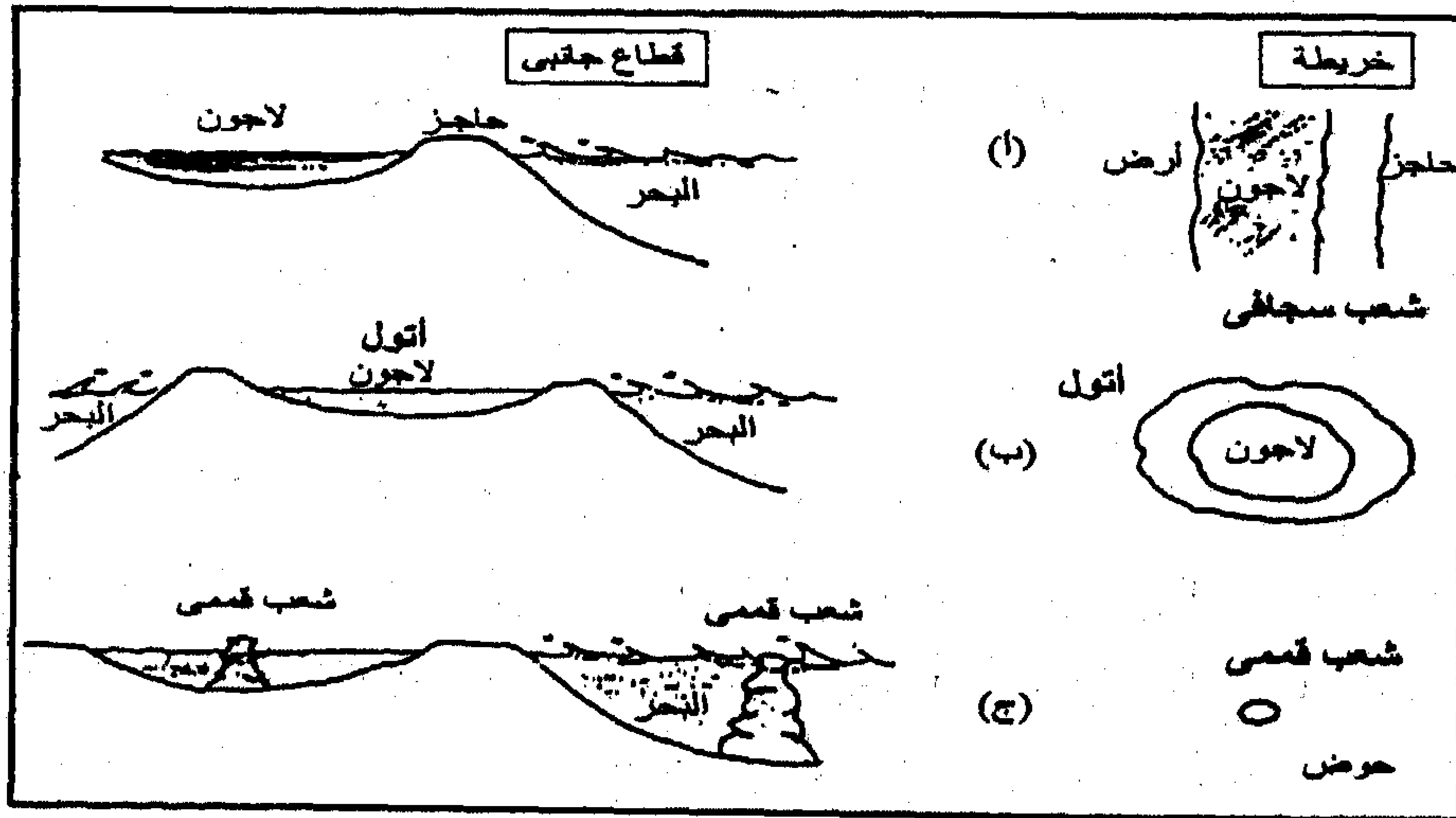
وتنقسم الشعاب المرجانية إلى ثلاثة أنواع حسب أمكنة وجودها وهذه الأنواع هي:

الشعاب السجافية (الحافّية) fringing reefs: وهذه تكون مصاطب أو أرصفة للشواطئ ولا تظهر فوق الماء إلا أثناء الجزر (شكل ٦-٩أ).

الشعاب الحاجزية barrier reefs: وهذه تكون أرصفة عالية في هيئة حواجز حول الشاطئ ويفصلها عنها بحيرات شاطئية طولية تعرف باللاجونات legoons (شكل ٦-٩ أ وب)

الشعاب الحلقية atolls: وهي شعاب شكلها دائري كاملة الاستدارة تماماً أو تقريباً تحصر بداخلها لاجونات مستديرة (شكل ٦-٩ ب) وهي مسطحات مائية صغيرة بجوار شاطئ البحر.

الشعاب القممية pinnacle reefs: وهي شعاب صغيرة الحجم تبرز إلى أعلى وذات جوانب منحدرة (شكل ٦-٩ ج).



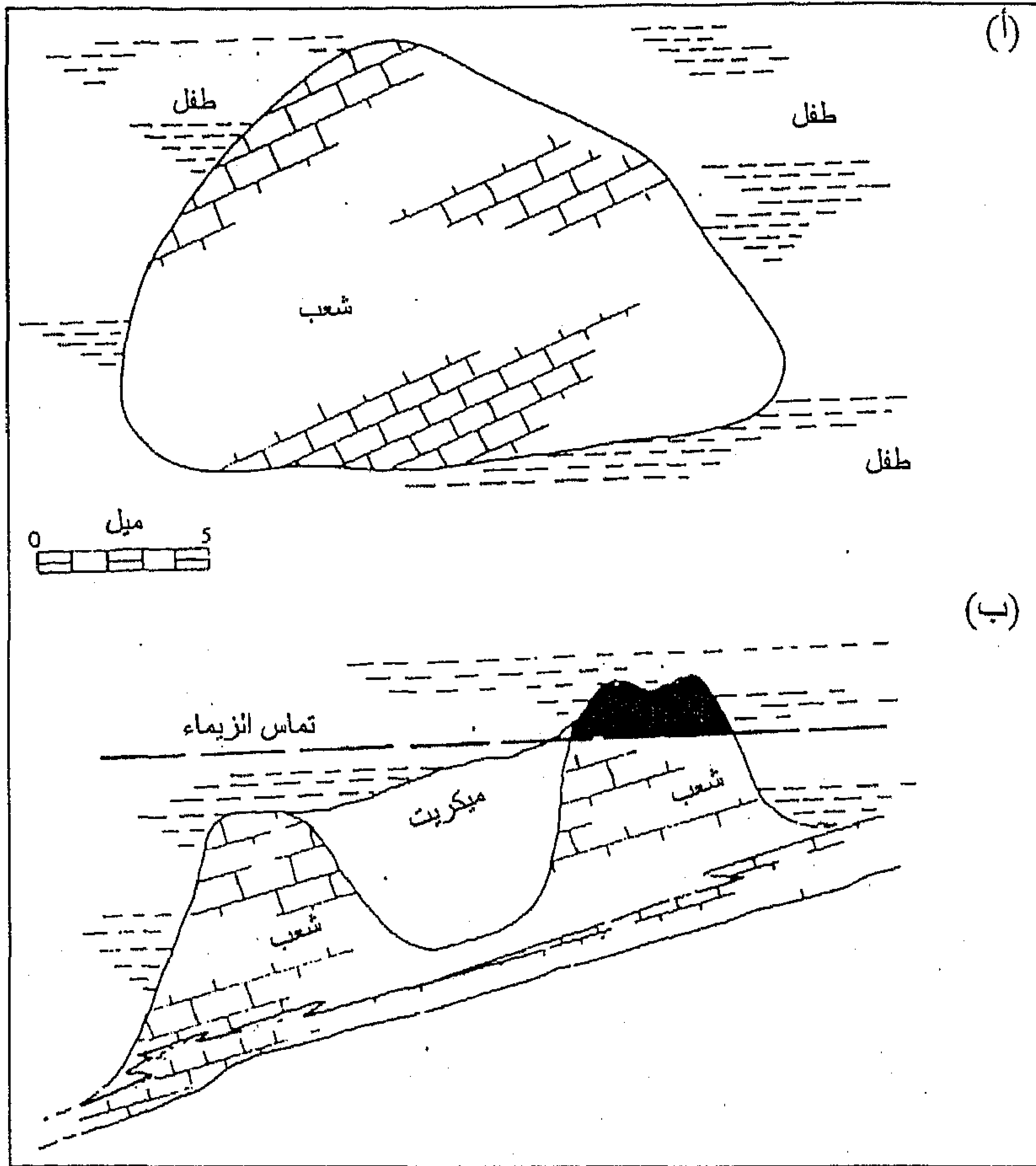
شكل ٦-٩: الشعاب المرجانية المختلفة.

ولقد اهتم الجيولوجيون وعلماء المحيطات بالطرق التي تكونت بها الأنواع المختلفة للشعاب المرجانية، وقدمت عدة نظريات في هذا الشأن كانت أحد أبرزها تلك المعروفة بنظرية الهبوط subsidence hypothesis التي وضعها تشارلز داروين عام ١٨٤٢ وحسب هذه النظرية فإن هناك ثلاث مراحل لتكوين الشعب المرجاني، حيث يتكون في البداية شعب سجافي عندما ينمو المرجان في المياه الضحلة قرب شاطئ جزيرة وبمرور الزمن تهبط الجزيرة تدريجياً بينما يستمر المرجان في نموه فوق قمة الشعب ويكبر الشعب بالتدريج ويفصله عن الجزيرة المنكمشة لاجون وبذلك يتكون الشعب الحاجزي، أما في المرحلة الأخيرة وطبقاً لهذه النظرية فيتكون الشعب الحلقي بشكله المستدير ويحيط باللاجون التي تغطي الجزيرة التي غمرت حديثاً. وبالإضافة إلى نظرية الهبوط هناك فرضية دالي للتحكم الجليدي (١٩١٠) والتي تفترض أن الشعاب الحاجزية والحلقية قد تكونت فوق الجزر البركانية المكشوطة التي تعرضت لعوامل التعرية البحرية نتيجة للتغير في مستوى سطح البحر خلال الفترات الجليدية في عصر البلستوسين. وكما يبدو فإن نظرية داروين تؤيد فكرة الهبوط نتيجة الحركات الأرضية بينما فرضية دالي تري من ارتفاع منسوب البحر نتيجة التغيرات المناخية الجيولوجية وبالطبع فإن النتيجة النهائية للعمليتين واحدة؛ لذا فقد اقترح أن الشعاب المرجانية ربما تكون قد تكونت نتيجة لكل من فرضيتي الهبوط والتحكم الجليدي وقد تفسر نظرية واحدة حالة ما وتفسر الثانية حالة أخرى.

وتعتبر الشعاب الحاجزية والحلقية القديمة من الخزانات الجيرية للبترول نظراً لما تحتويه من مسامية ساعدت في تعزيزها المياه العذبة التي تخللت المسام الصخرية وعملت على إذابة الحجر الجيري وتوسيع مسامه، أما بالنسبة للاجون فيترسب بها الطين الجيري الذي يعرف بالميكريت micrite وهو صخر غير صالح لاختزان الزيت أو الغاز لافتقاره إلى الخصائص الخزانية اللازمة.

ومن أمثلة الحقول المنتجة من الشعاب المرجانية هناك العديد ومنها التي قد يتخطى احتياطيها القابل للاستخراج أكثر من ٢٥٠ مليون برميل من الزيت الخام وتعمل طبقات الطفل والملح كصخور غطاء تمنع تسرب البترول إلى خارج المصيدة، فحقل ردووتر Redwater field في ولاية ألبرتا يعتبر ثاني أكبر حقول البترول في كندا وهو عبارة عن تراكم جيري بيضاوي الشكل على هيئة شعب حلقي (أتول) ويغطي مساحة

نحو ٥٢٠ كيلومتر مربع وبعرض ٢٤ كيلومتراً، والشعب الحلقي هو الصخر الخزان ويتوقع أن ينتج الحقل نحو ٨٥٠ مليون برميل من الزيت (شكل ٦-١٠).



شكل ٦-١٠ : (أ) خريطة لحقل ردووتر بولاية ألبرتا بكندا.

(ب) قطاع جانبي يوضح وجود البترول في الشعب الحلقي المساحي بنفس الحقل.

أرصفة الحجر الجيري:

رصيف الحجر الجيري limestone platform هو مساحة كبيرة مغطاة بمياه البحار المدارية الضحلة حيث تتهيأ الفرصة هناك لترسيب الأحجار الجيرية، وعلى بعض من الأرصفة الجيرية تسود تيارات بحرية قوية، ولما كان الماء الاستوائي مشبعاً بكربونات الكالسيوم فإنه عند مروره على الأرصفة الجيرية فإن كربونات الكالسيوم تنفصل من الماء الحامل لها مكونة حبيبات كروية من حجم الرمل والغرين تعرف بالبطارخ oolites

ويسمى الحجر الجيري عندئذ بالحجر الجيري البطروخي أو الأوليتي oolitic limestone وهذا النوع من الحجر الجيري يتميز بمساميته العالية وكفاءته الجيدة كصخر خزان. ومن الأمثلة الحقلية من الحجر الجيري البطروخي حقل ماجنوليا Magnolia للبترول في أركانساس بالولايات المتحدة حيث تم اكتشاف هذا الحقل في عام ١٩٣٨ عن طريق المسح الجيولوجي والسيزمي، وتتشكل مصيدة الزيت بالحقل من طية محدبة طولها نحو ١٠ كيلومترات وعرضها نحو ٢،٥ كيلومتر، ويأتي إنتاج هذا الحقل من تكوين رينولدز البطروخي Reynolds Oolite من العصر الجوارسي ويبلغ سمك التكوين حوالي ٩٠ متراً وقد وصل الإنتاج التراكمي من هذا الحقل حتى الآن إلى نحو ١٤٠ مليون برميل من الزيت.

الحجر الجيري الكارستي:

من المعروف أن الحجر الجيري سريع الذوبان في الماء العذب خاصة في المناطق ذات المناخ الدافئ والرطب، ذلك أن مياه الأمطار والمياه بالتربة تمتص ثاني أكسيد الكربون لتكون حامض الكربونيك الذي يعمل على إذابة كربونات الكالسيوم، وإذا كانت هذه الإذابة بالغة الدرجة فيطلق على الصخر حينئذ الحجر الجيري الكارستي karst limestone وهو صخر يتمتع بمساميته ونفاذيته العاليتين للغاية، وعليه فقد تتواجد الكهوف في هذا الصخر ولكن في أغلب الحالات تتجاوز أقطار المسام عدة بوصات والتي يطلق عليها التجاويف vugs، وللعلم فإن حقول البترول العملاقة بالشرق الأوسط تتكون أساساً من صخور الحجر الجيري الكارستي العالية المسامية والنفاذية. وتجدر الإشارة إلى أن التجاويف داخل الصخر الجيري لا يمكن التعرف عليها باستخدام الطريقة السيزمية لكن عادة ما يتم اكتشافها بالصدفة، وفي أغلب الأحوال يتواجد الحجر الجيري الكارستي مباشرة تحت سطح اللاتوافق الزاوي.

صخور الطباشير:

الطباشير chalk هو أحد أشهر الصخور الرسوبية المعروفة وهو حجر كربوناتي ذو لون أبيض ونسيج دقيق ويتكون أساساً من أصداف الحفريات الدقيقة microfossils من الكائنات الحيوانية مثل الفورمينفرا foraminifera أو النباتية مثل الكوكوليثوفورات cocolithophores التي تنمو طافية في البحار المدارية وتتكون بنيتها من كربونات

الكالسيوم، وعندما تموت هذه الكائنات فإن أصدافها تسقط في قاع البحر مكونة الطباشير بمرور الوقت.

ويوجد الطباشير في أماكن متفرقة من العالم ونظراً لدقة مساميته فإنه لا يشكل في أغلب الحالات صخوراً خزانية جيدة، وفي الصحراء الغربية في مصر هناك صخور الخومان Khoman من العصر الطباشيري والتي تتكون أساساً من الطباشير والحجر الجيري وقد يصل سمكها إلى أكثر من ١٥٠٠ متر، وبصورة عامة فإن هذه الصخور ذات نفاذية منخفضة وتفتقر إلى الخصائص الخزانية باستثناء حالات محدودة أعطت معدلاً إنتاجياً من الغاز بلغ نحو ١٥ مليون قدم مكعبة في اليوم.

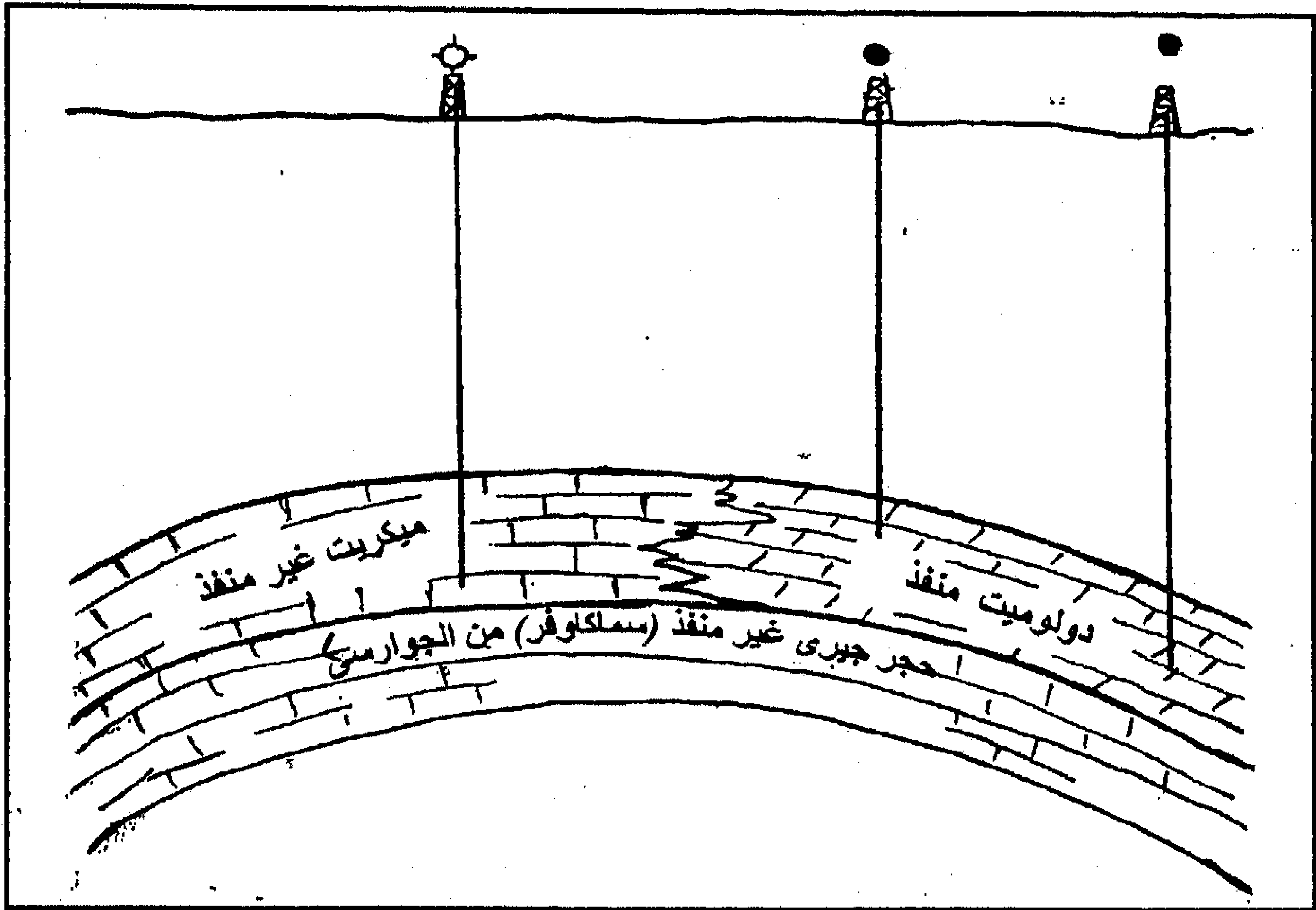
صخور الدولوميت:

سبق أن أشرنا إلى معدن الدولوميت ولكننا الآن نتناوله كصخر لنعرف مدى قدرته الخزانية، والدولوميت هو صخر رسوبي تكون أساساً من حجر جيري غزته المياه الغنية بالمغنيسيوم وتسببت في عمليات إحلال جزئي لعنصر المغنيسيوم محل الكالسيوم ليصبح التركيب الكيميائي $CaMg(CO_3)_2$ بدلا من $CaCO_3$، وإذا ما كان ذلك الحجر الجيري غير منفذ كما هو الحال في صخر الميكريت micrite أو كان في حالة متبلورة تقلص من درجة نفاذيته فإن فعل المياه سوف يتركز في الأماكن الموجودة حول الشقوق حيث يمكن للمياه المتخللة الانسياب خلالها.

ومن المعروف أنه يصعب التمييز بين الدولوميت والحجر الجيري نظراً لتشابهها في الشكل البلوري واللون والصلادة ولكن يمكن التعرف على الحجر الجيري بتفاعله على البارد مع حامض الهيدروكلوريك المخفف وتصاعد غاز ثاني أكسيد الكربون، أما الدولوميت فلا يتفاعل مع الحامض إلا إذا كان الحامض مركزاً وساخناً ونظراً لأن عمليات الإحلال تقوم على أساس ذرة بذرة وحيث أن ذرة المغنيسيوم أقل حجماً من ذرة الكالسيوم فسوف يكون ذلك على حساب حجم الفراغات البينية للصخر التي سوف تزداد بنسبة قد تصل إلى نحو ١٣ ٪من المسام الأصلية، وعليه فإن صخور الدولوميت عادة ما تكون صخوراً خزانية جيدة، ومن ناحية أخرى فإنه أحيانا ما يفقد الحجر الجيري جزءا من مساميته إذا ما دفن عند أعماق كبيرة وتعرض بالتالي إلى المزيد من الانضغاط بسبب الرواسب اللاحقة، أما الدولوميت فلا يتأثر بذلك كثيراً حيث إنه أكثر مقاومة

للانضغاط وأقل ذوبانا في الماء، وبالتالي فإنه يحتفظ بمساميته الأصلية بدرجة أكبر، كما أن بلورات الدولوميت غالبا ما تكون أكبر في الحجم من حبيبات الحجر الجيري مما يساعد على زيادة نفاذية الصخر وهو ما نراه في بعض الشعاب الدولوميتية التي قد تصل في نفاذيتها إلى عشرة أمثال مثيلتها في الحجر الجيري.

وهناك العديد من الحقول ذات الخزانات الدولوميتية نسوق منها على سبيل المثال حقل جاي Jay بولاية فلوريدا الأمريكية، والذي يضم تركيباً جيولوجياً عبارة عن طية محدبة على عمق نحو ٤٥٠٠ متر، ونصف هذا التركيب هو المنتج بسبب وجود صخر الدولوميت الذي حل محل الميكريت غير المنفذ والذي يغلب وجوده في النصف الآخر من التركيب كما في شكل ٦-١١ ويقدر حجم المخزون الأصلي من الزيت بحوالي ٧٣٠ مليون برميل من الزيت الخام العالي الجودة (51°API)، كما يقدر الاحتياطي القابل للاستخراج بحوالي ٣٦٤ مليون برميل، ويبلغ السمك الفعال للطبقة المنتجة نحو ٣٠ متراً.



شكل ٦-١١: قطاع في حقل جاي بفلوريدا حيث الإنتاج من صخر الدولوميت المنفذ.

الفصل السابع
الخرائط الجيولوجية

تعريف الخريطة الجيولوجية:

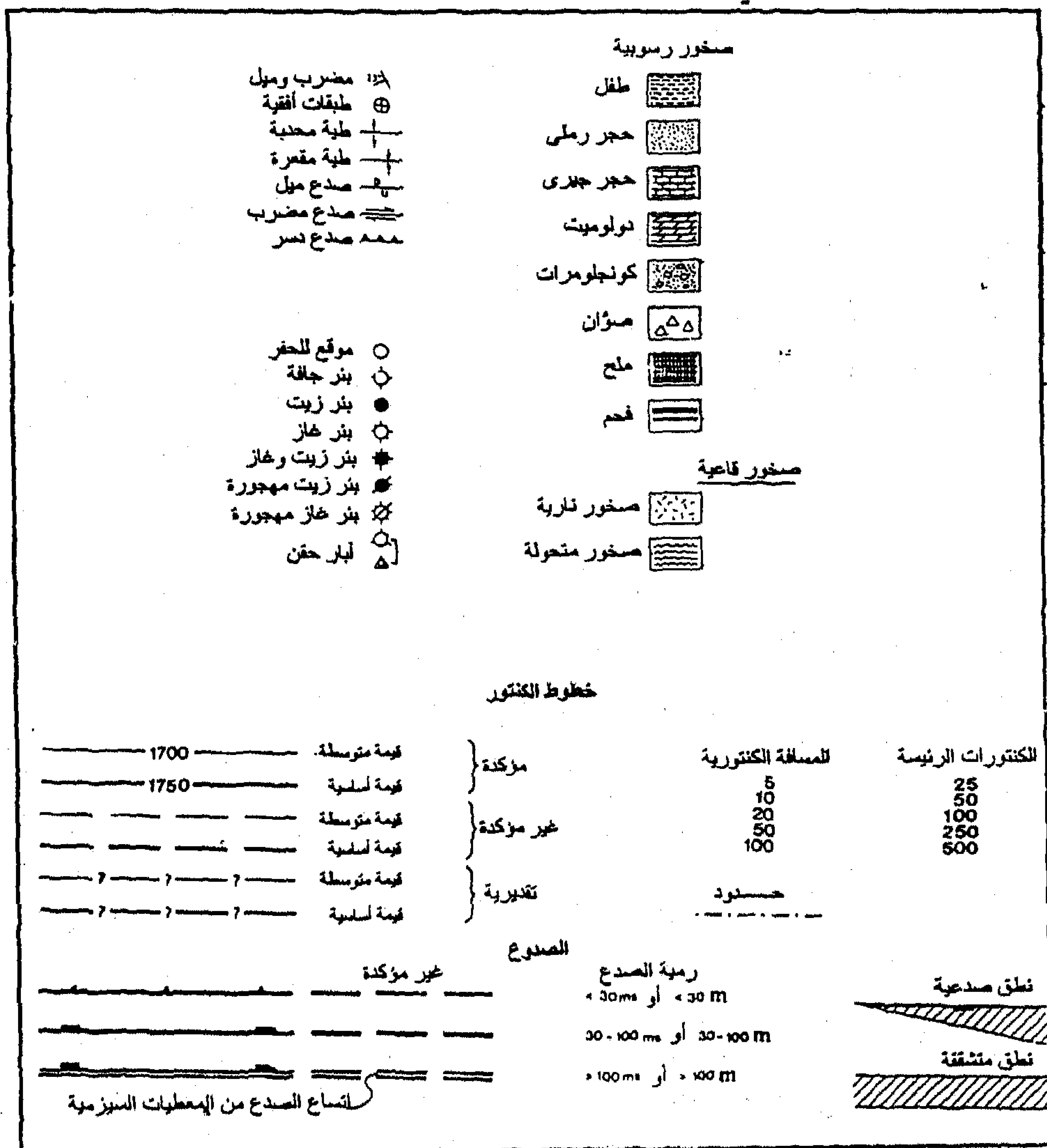
الخريطة الجيولوجية geologic map هي وسيلة للتعبير عن المعالم الطبوغرافية والجيولوجية وللتفاهم بين الجيولوجين والمهندسين المعنيين، ويستخدمها هؤلاء في مجالات الاستكشاف والتنمية على حد سواء للتعرف على الإمكانيات الاقتصادية للمعادن الطبيعية والمياه الجوفية والبترول والغاز الطبيعي وأيضاً في مشروعات الهندسة المدنية والتعدين ذات الصلة، والخريطة الجيولوجية باختصار هي بيان بالرسم أو الرمز يوضح تصوراً عن طبيعة المنطقة قيد الدراسة، ويساعد هذا التصور على استنتاج الوضع والنظام الهندسي للمعالم والتراكيب والطبقات ذات الاهتمام ومدى قيمتها الاقتصادية من حيث الاستفادة منها واستغلالها، لذا فإن الخريطة الجيولوجية هي دائماً أول معين مختصر وواف للمعلومات يمكن للجيولوجي أن يلجأ إليه بشرط أن تكون لديه القدرة على تفهم مدلولات رموزه.

وتتنوع الخرائط الجيولوجية حسب الهدف الذي من أجله صممت فمنها الخرائط الطبوغرافية والخرائط الكنتورية للتكاوين الجيولوجية وسمك وتوزيع الطبقات الصخرية وخصائصها المختلفة، وقبل أن نتناول أنواع هذه الخرائط وفي جميع الأغراض هناك خرائط الأساس base maps والتي تعتبر المادة اللازمة لرسم الخريطة المطلوبة، كالإحداثيات الأساسية لمنطقة معينة وكذا مواقع الآبار إن وجدت والرموز الجيولوجية المناسبة (شكل ٧-١)، كما قد تتضمن أيضاً مواقع الخطوط السيزمية أو شبكة المساحة المغناطيسية والجاذبية وغير ذلك من بيانات يتطلبها رسم الخريطة المعنية.

وتجدر الإشارة إلى أنه عادة ما تجري مضاهاة correlation بين الوحدات الصخرية المتشابهة سواء كان ذلك في العمل السطحي أو تحت السطح حيث تعطي هذه المضاهاة تصوراً مفيداً يخدم فهم الوضع الترسيبي والبنائي للمنطقة المراد دراستها، وتعتبر تسجيلات الآبار من الأدوات الأساسية في هذا الشأن كما سيرد الحديث عن ذلك فيما بعد.

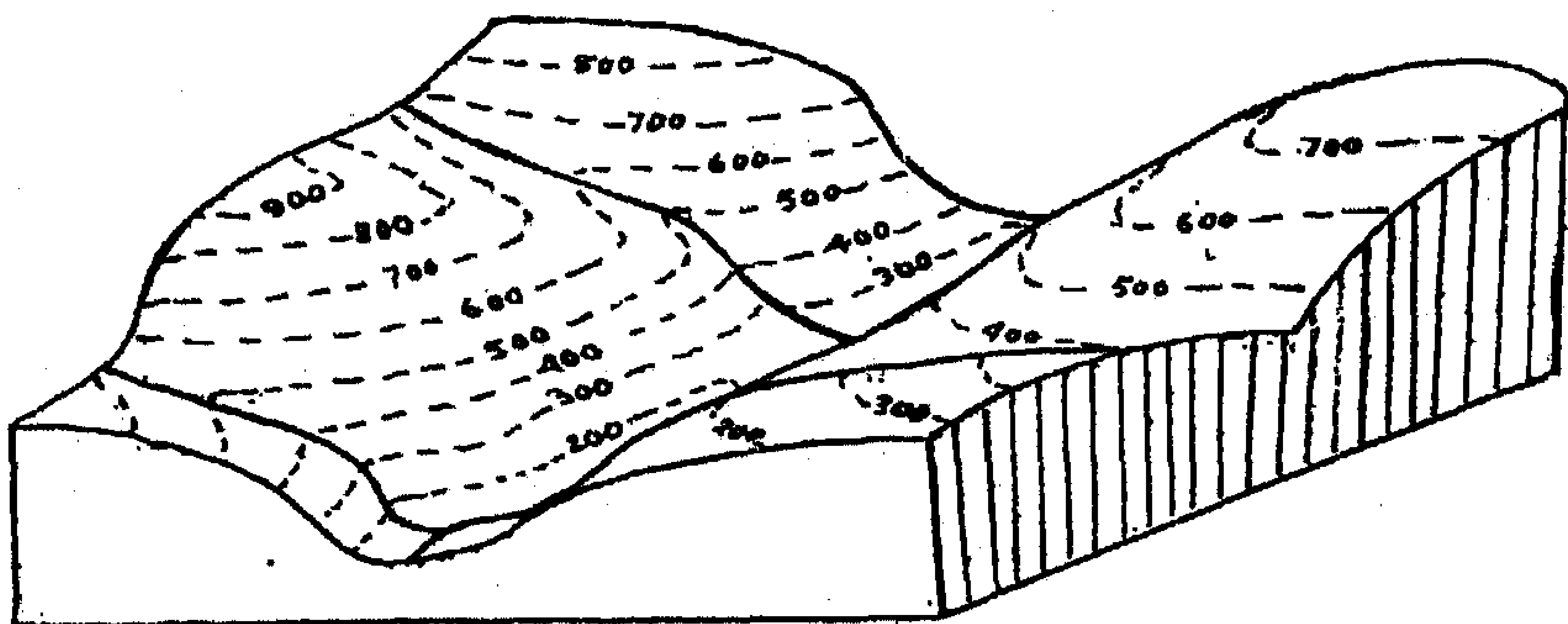
الخرائط الطبوغرافية:

الخريطة الطبوغرافية topographic map هي بيان للمعالم الطبيعية المختلفة من تضاريس في هيئة مرتفعات ومنخفضات ووديان وجروف وشواطئ وأنهار وغير ذلك وأحياناً للمنشآت والمباني أيضاً، وكل هذه المعالم السطحية الثلاثية الأبعاد تبين على الخريطة الطبوغرافية ذات السطح الثنائي الأبعاد بواسطة خطوط كنتورية contour lines وكل خط كنتوري يحمل رقماً يبين ارتفاع جميع النقط التي يمر بها بالنسبة لسطح البحر sea level كمنسوب عالمي.

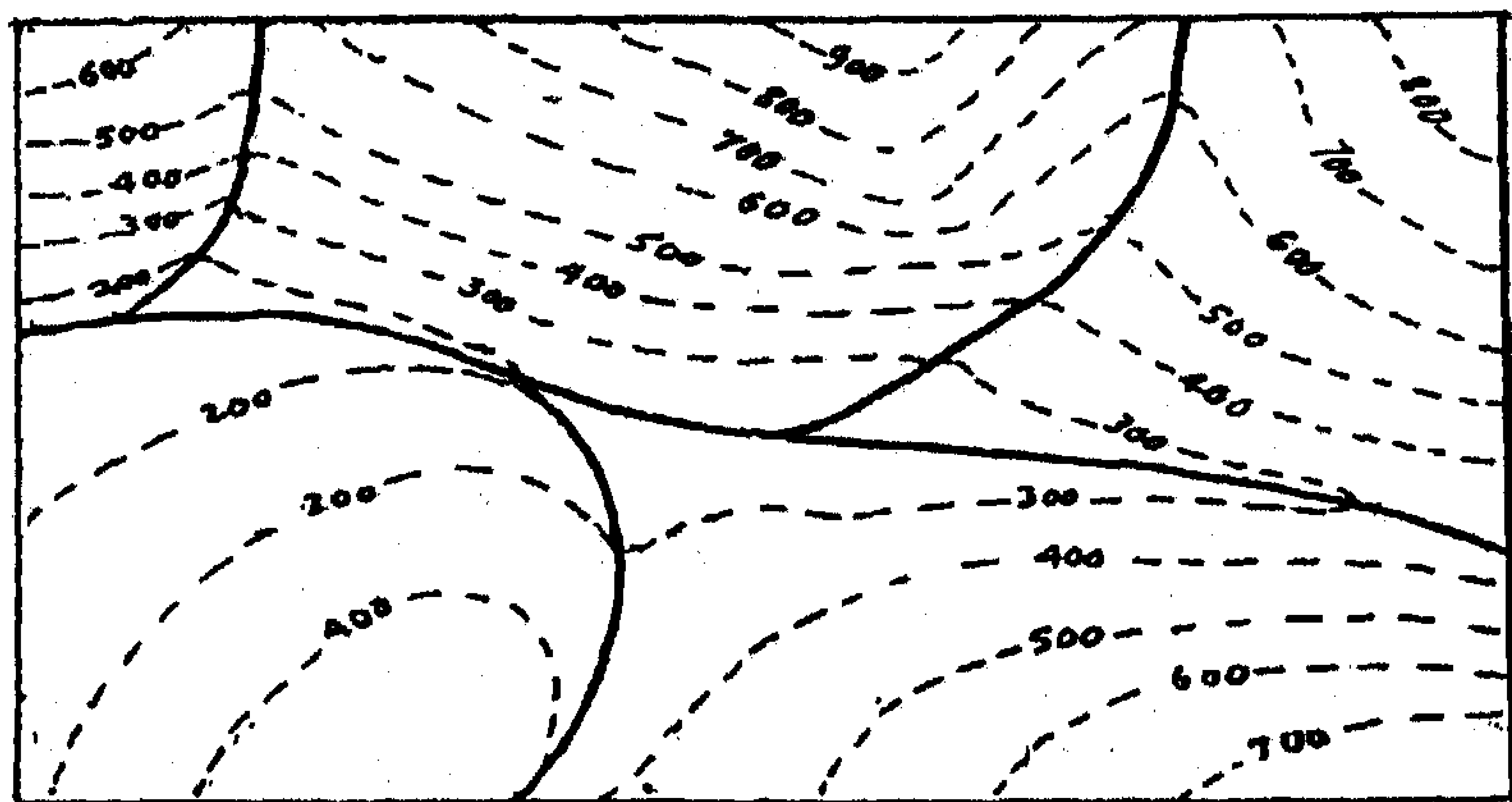


شكل ٧-١ : الرموز الجيولوجية الأساسية والمستخدمة في استكشاف وتنمية حقول البترول.

ويوضح الشكل ٧-٢ رسماً مجسماً لمنطقة بسيطة التضاريس مبين عليها الخطوط الكنتورية التي تمثل ارتفاعات متتالية من أسفل إلى أعلي، والشكل ٧-٣ يبين مساقط هذه الخطوط ممثلة في الخريطة الطبوغرافية. وتؤخذ خطوط الكنتور على مسافات رأسية ثابتة تعرف بالمسافة الكنتورية contour interval أي أن يكون الفرق بين كل اثنين منها واحداً، مائة متر بين كل الخطوط أو مائتين وهكذا، وترسم الخريطة الطبوغرافية حسب مقياس رسم scale مناسب فقد يكون ممثلاً بـ ١ سم لكل ١٠٠ متر في الطبيعة وفي هذه الحالة عادة ما يكتب ١ : ١٠٠٠٠، وبالطبع فإنه يمكن رسم الخريطة يدوياً أو باستخدام الحاسوب وفق برنامج خاص، إلا أن الاستخدام اليدوي في رسم الخريطة قد يكون هو الأفضل حيث أن التصور البشري يفوق العمل الآلي الذي لا يعتمد على التفكير والاختيار الأفضل.



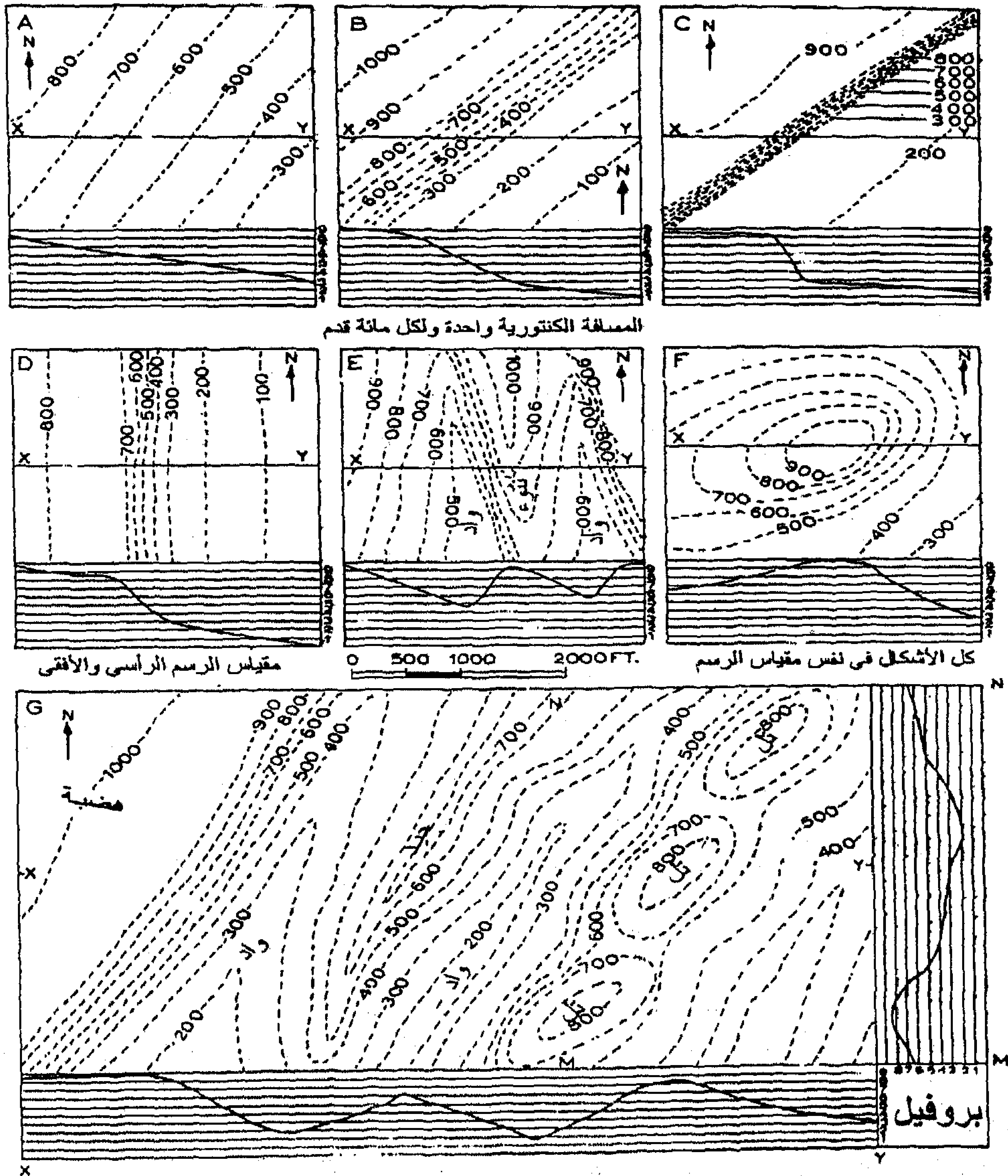
شكل ٧-٢: رسم مجسم لمنطقة بسيطة التضاريس مبين عليها الخطوط الكنتورية.



شكل ٧-٣: مساقط الخطوط الكنتورية على سطح الورقة (خريطة طبوغرافية).

ومن أهم خصائص خطوط الكنتور أنها لا يمكن أن تتقاطع، إذ إن تقاطع كنتورين لهما ارتفاعان مختلفان يعني أن سطح الأرض في نقطة التقاطع له قيمتان مختلفتان وهذا

بالطبع مستحيل. وفيما يتعلق بأهم المعالم الطبوغرافية التي يمكن تمييزها على الخرائط هناك الهضبة plateau والسهل plain وهما عبارة عن أرض منبسطة: الأولى فوق جزء مرتفع بالنسبة لما حولها، والثانية عبارة عن أرض منبسطة فوق جزء منخفض بالنسبة لما حولها، ويتميز سطح الهضبة على الخريطة بعدم وجود كنتورات أو بوجود كنتورات شديدة التباعد ولكنه يحاط بكنتورات تقل تدريجياً في الارتفاعات نحو الخارج، والعكس تماماً بالنسبة للسهل (شكل ٧-٤).



شكل ٧-٤: قطاعات ومساقط وخريطة تبين المعالم الطبوغرافية وسماتها.

وهناك الوادي valley الذي يتميز بأن كنتوراته تأخذ شكل الرقم ٨ الذي تشير رأسه إلى أعلى الوادي أو المنبع upstream وهي تقل في القيمة كلما قربت من فم الوادي، وقد تتخذ الكنتورات نفس شكل كنتورات الوادي ولكنها تزيد في الارتفاع بدلاً من أن تقل ارتفاعاتها كلما قربت من وسط الرقم ٨ فيعرف المَعْلم الطبوغرافي في هذه الحالة بالحيد أو المهماز spur وهي أجزاء مرتفعة مستطيلة يقل عرضها كثيراً عن طولها. وعندما ينحدر واديان على جانبي جزء مرتفع من الأرض فإن هذا المرتفع الذي يفصل بين نقطة بداية كل من الواديين يسمى بالسرج saddle الذي يوجد عادة عند قمة الجبل (راجع الشكل ٧-٤).

والمنحدرات أنواع فمنها المنحدر اللطيف gentle slope الذي تكون خطوط كنتوراته متباعدة ومنها الوعر steep وتكون كنتوراته متزاحمة عندما تكون درجة الإنحدار قريبة من الوضع الرأسي.

ويمثل خط البروفيل profile line شكل سطح الأرض في قطاع رأسي في منطقة ما في اتجاه معين ليبين التضاريس على امتداد هذا الاتجاه، وعند رسم هذا الخط يجب التقيد باستعمال نفس مقياس رسم الخريطة على المحور الرأسي لخط البروفيل إذ إن الشكل الطبيعي لهذا الخط ينتج فقط باستعمال المقياس الذي وسمت به الخريطة ويتغير حتماً شكل هذا الخط عند استعمال مقياس آخر.

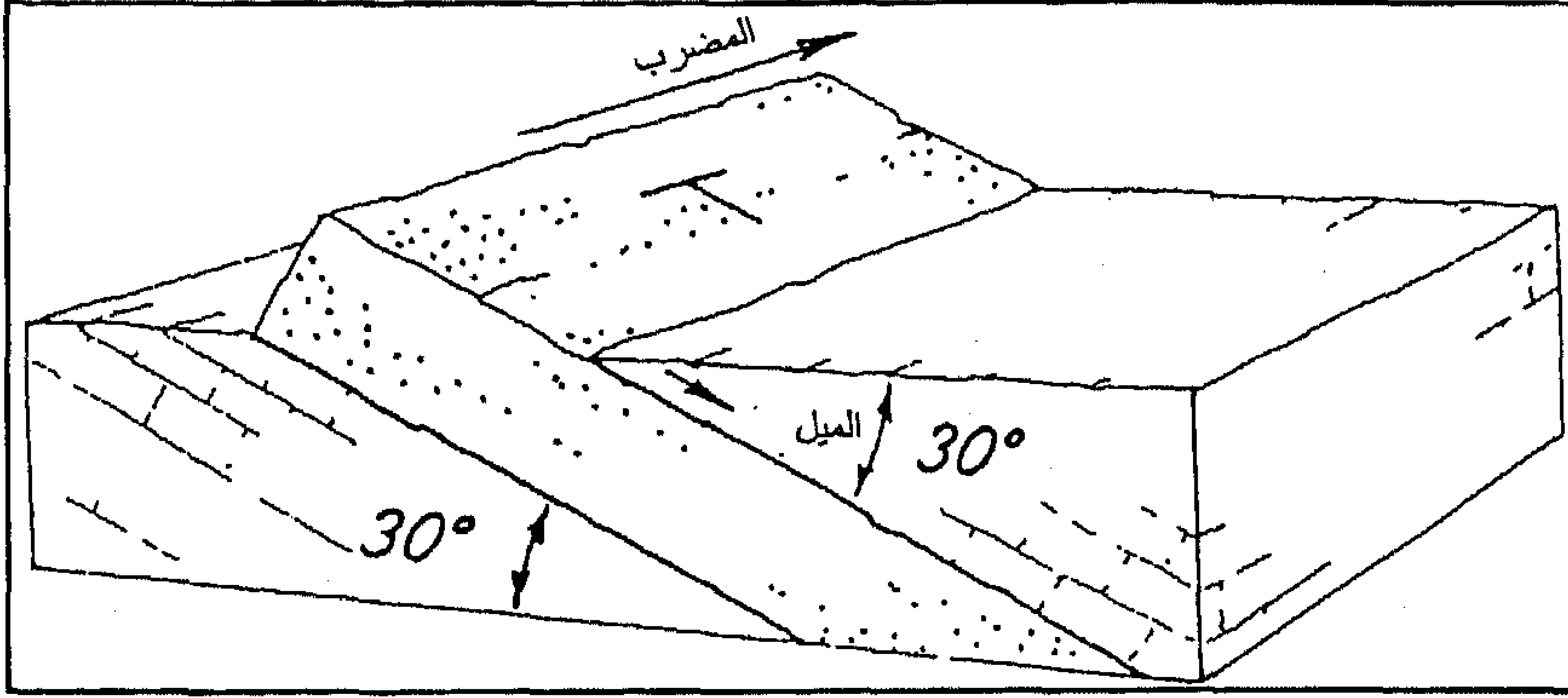
الخرائط الجيولوجية:

الخريطة الجيولوجية geologic map هي خريطة طبوغرافية مبين عليها أنواع الصخور المكونة للمنطقة التي تمثلها وكذلك علاقة الصخور بعضها ببعض وتراكيبها البنائية وكل ما إلى ذلك من معلومات جيولوجية، وتحتوي كل خريطة جيولوجية على ما يسمى بدليل الخريطة legend وهو بمثابة مفتاح يبين معاني ما بها من رموز كما يستدل منه على طبيعة وأعمار الطبقات أو الكتل الصخرية المختلفة التي تتكون منها المنطقة، وبالإضافة إلى ذلك فهناك علامات ورموز أخرى لتوضيح ميل dip الطبقات ومضربها strike واتجاهات كل منها وغير ذلك من المعلومات الجيولوجية، وأبسط الحالات هي عندما تكون صخور المنطقة مكونة من عدة طبقات أفقية، وفي هذه الحالة تكون الحدود

بين الطبقات هي خطوط منطبقة على الخطوط الكنتورية أو موازية لها، ويتوقف شكل مكاشف outcrops الطبقات الأفقية في الخريطة الجيولوجية على سمكها أساساً، وهو بجانب السمك يتوقف في حالة الطبقات الأفقية على طبوغرافية المنطقة، أما في حالة الطبقات المائلة أو الموجودة في هيئة تراكيب جيولوجية مختلفة فإن شكل مكاشفها في الخريطة يتوقف كذلك على الميل.

ويمكن بالتالي أن تعرف الخريطة الجيولوجية بأنها تمثيل ثنائي الأبعاد لسطح الأرض، أما البعد الثالث فيمثل اتجاه الطبقات والذي يحدده كل من مضرب هذه الطبقات ومقدار ميلها.

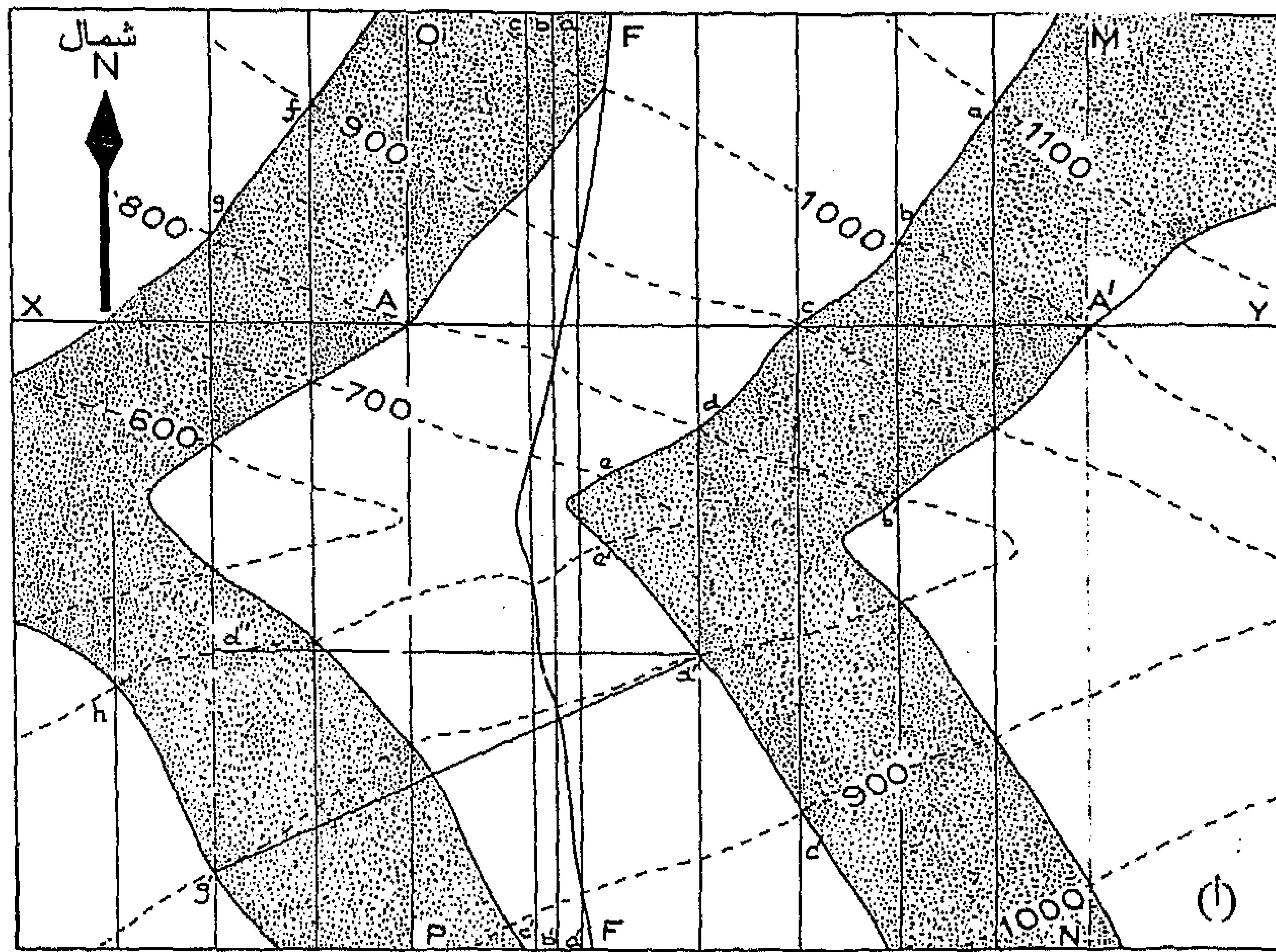
ويعرف المضرب بأنه خط أفقي على سطح الطبقة (شكل ٧-٥)، وفي حالة الطبقة الأفقية فإنه يمكننا أن نتصور عدداً لا نهائياً من الخطوط الأفقية على سطح هذه الطبقة، أما إذا كان السطح مائلاً فإن جميع الخطوط الأفقية التي يمكن رسمها عليه تكون متوازية وفي اتجاه واحد فقط ويسمى هذا الخط بخط المضرب strike line، ويمكن التعرف على خط المضرب من اتجاهه بالنسبة لاتجاه معروف (غالباً الشمال المغناطيسي أو الجغرافي، ويقال مثلاً أن اتجاه خط المضرب هو ٢٦٠° وارتفاعه ٥٠٠ متر، وهذا يعني أنه ينحرف عن الشمال بزاوية قدرها ٢٦٠° ويرتفع عن سطح البحر بمقدار ٥٠٠ متر، أما ميل الطبقات dip of beds فهو الاتجاه الذي يبلغ عنده ميل سطح الطبقة أقصاه باتجاه الميل ويعرف أيضاً باتجاه الميل الحقيقي direction of true dip ، ويقاس مقدار هذا الميل بالزاوية الرأسية التي بين السطح المائل وسطح آخر أفقي وتعرف هذه الزاوية بزاوية الميل angle of dip (شكل ٧-٥)، وبالطبع فإن زاوية ميل خط المضرب تساوي صفراً إذ إنه خط أفقي، وتجدر الإشارة إلى أن هناك فرقاً بين الميل والانحدار slope، فالميل يعني انحراف الطبقة عن الوضع الأفقي أما الانحدار فهو انحراف سطح الأرض عن الوضع الأفقي ولا علاقة له بالطبقات.

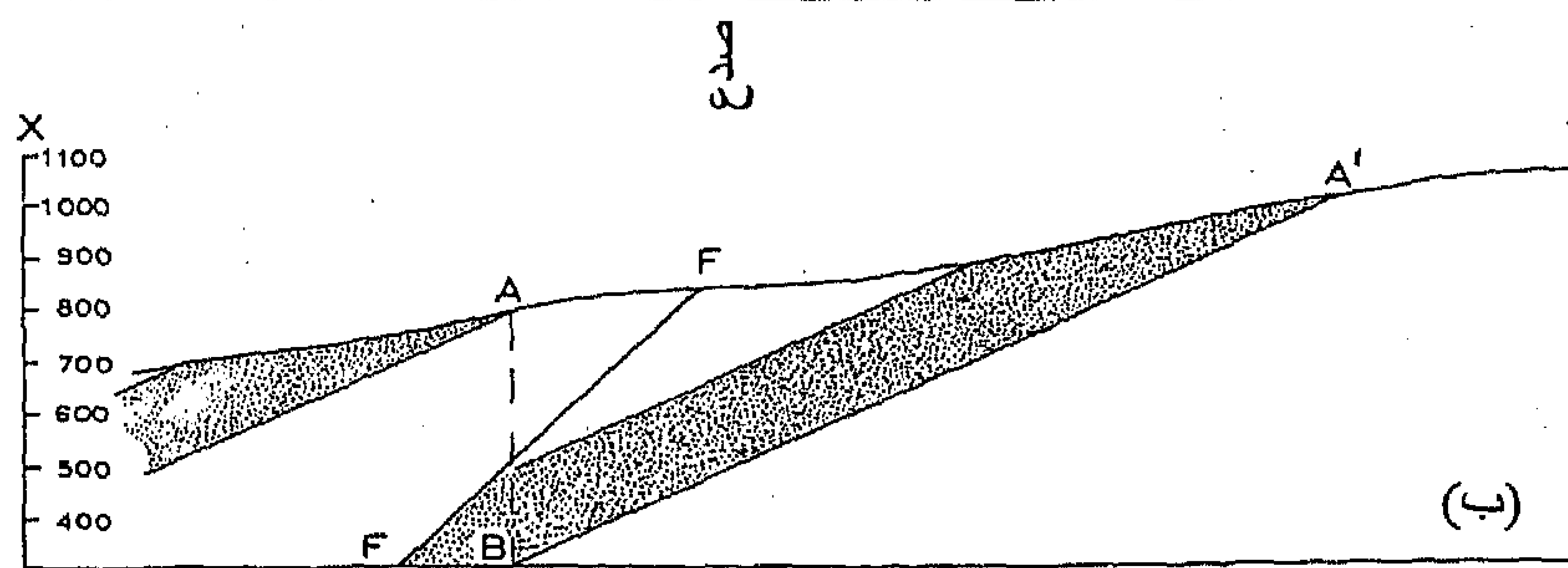


شكل ٧-٥: المضرب والميل في طبقة رسوبية.

وكما أن هناك خطوطاً ومسافات كنتورية هناك أيضاً خطوطاً ومسافات مضربية، والخطوط المضربية بالنسبة لمستوى يميل ميلاً منتظماً في اتجاه واحد تكون في هيئة خطوط مستقيمة متوازية تفصلها مسافات متساوية تعرف بالمسافات المضربية strike intervals ويجب أن تتساوى المسافات المضربية مع المسافات الكنتورية في القيمة الحقيقية على الطبيعة، أما على الخريطة فيتوقف مدى تباعدها عن بعضها البعض على ميل الطبقات، فإذا كان الميل شديداً ضاقت المسافات وتزاحمت خطوط المضرب وإذا كان لطيفاً اتسعت وتباعدت. وتبين مكاشف الطبقات المختلفة على الخرائط الجيولوجية بألوان متباينة أو بدرجات متفاوتة من التظليل، ويحدد عليها اتجاه المضرب بخطوط قصيرة واتجاهات الميل بأسهم عمودية على هذه الخطوط تكتب بجانبها قيم زوايا الميل. ويمثل الشكل ٧-٦ خريطة جيولوجية بسيطة نوعاً ما حيث هناك مَعْلم طبوغرافي رئيس على هيئة واد، وأن جيولوجية المنطقة غير معقدة التركيب إلى درجة كبيرة حيث تظهر طبقة من الحجر الرملي مائلة (٢٧°) مقطوعة بصدع معكوس برمية تبلغ ١٥٠ متراً (حوالي ٥٠٠ قدم) وأن ميل هذه الطبقة شرق وغرب الصدع واحد.

وفي أعمال الاستكشاف والبحث عن البترول والغاز تكون الأفضلية لحفر الآبار أعلى الميل drilling updip حيث تتزايد فرص العثور في تلك المواقع العالية على البترول وتجمعه هناك، أما حفر الآبار أسفل الميل downdip فقد يؤدي إلى آبار خاوية (جافة) dry wells.





شكل ٧-٦ : (أ) خريطة طبوغرافية ومكاشف طبقة مائلة ومصدعة.

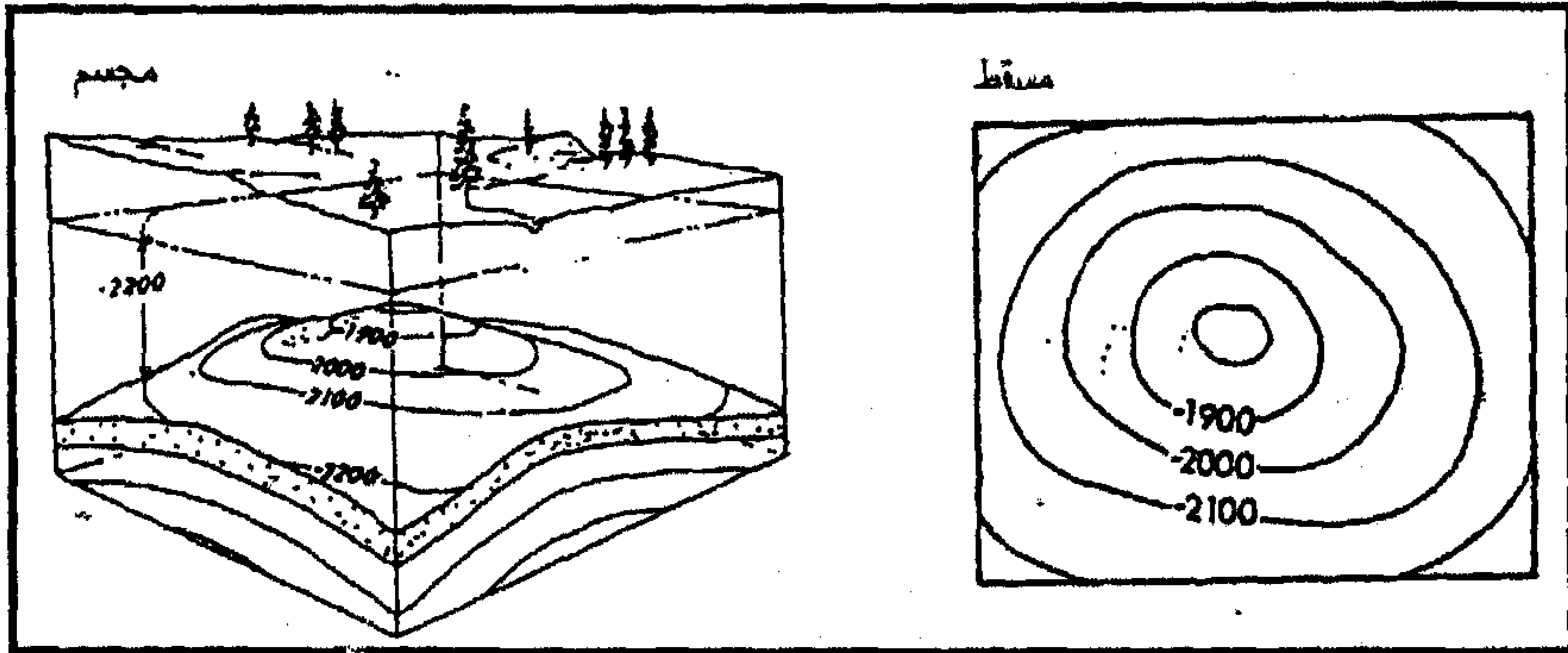
(ب) قطاع جانبي على طول Y-X يوضح الطبقة المائلة والمصدعة.

الخرائط التحتسطحية:

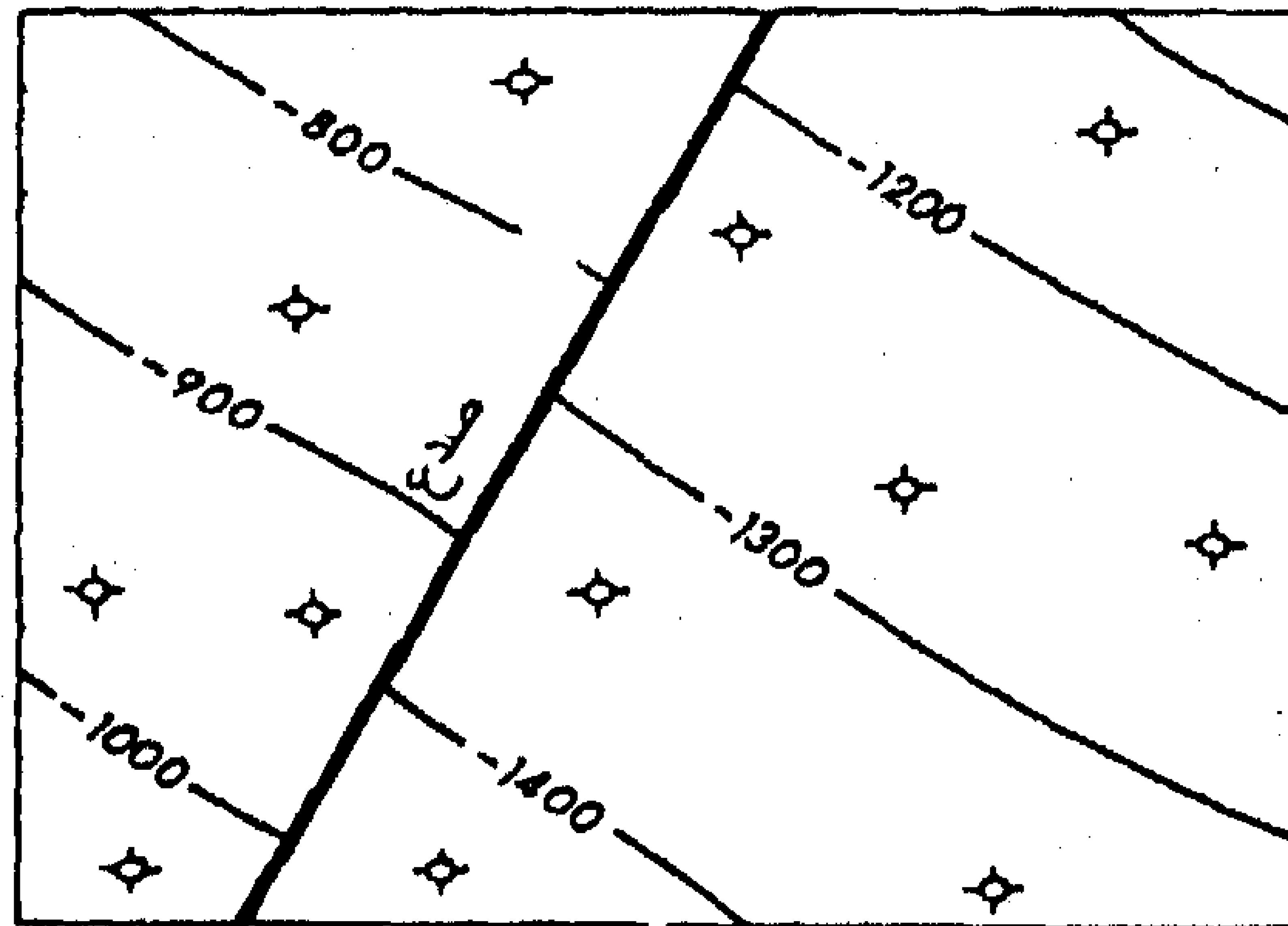
الخريطة التحتسطحية subsurface map هي الخريطة التي توضح المعالم الجيولوجية الموجودة تحت سطح الأرض من حيث بنيتها التركيبية وسمك الطبقات الصخرية وتوزيعها وخصائصها المختلفة، وهناك ثلاثة أنواع مهمة من هذه الخرائط وهي الخريطة التركيبية وخريطة السمك وخريطة توزيع النسب الصخرية، وفيما يلي عرض مختصر لكل نوع من تلك الخرائط.

الخريطة التركيبية:

تبين الخريطة التركيبية structural map السطح العلوي أو السفلي لطبقة معينة وترسم على هيئة خطوط كنتورية منسوبة إلى سطح البحر كمنسوب ثابت datum، وعادة ما تكون قيم الارتفاعات سالبة حيث إن أغلب مواقع الطبقات تكون على أعماق منخفضة عن سطح البحر، وتعتبر الخريطة المرسومة على السطح العلوي لصخر الخزان أو أي هدف جيولوجي آخر ذات أهمية كبيرة في معرفة نوع التركيب الجيولوجي والمصيدة البترولية هناك، ومن هذه الخريطة يمكن تحديد التراكيب الجيولوجية المختلفة مثل القباب والطيات المحدبة والصدوع، فمثلاً تتخذ القباب والطيات المحدبة أشكال دوائر عليها قيم الارتفاعات وتكون أعلى هذه القيم في مركز الدائرة كما هو مبين بالشكل ٧-٧، أما الصدوع فهي تتميز بالتغير السريع في قيم الارتفاعات على مدى الامتداد الجانبي، ويسبب الصدع العادي مثلاً فقداناً لجزء من الطبقة المعنية كما سبق الشرح وأن ثمة خطأً يفصل بين خطوط الكنتور كما هو موضح بالشكل ٧-٨.



شكل ٧-٧: خريطة تركيبية لطية محدبة.

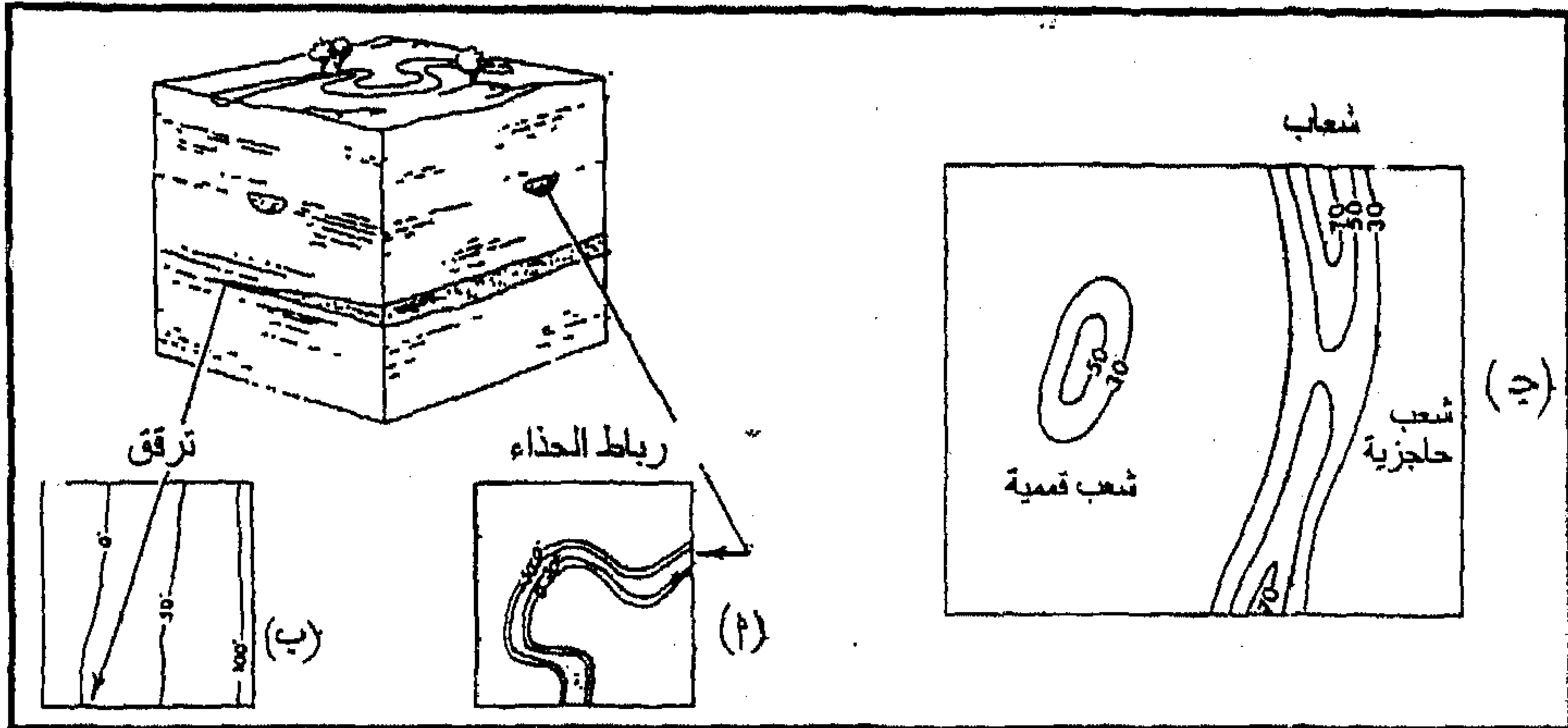


شكل ٧-٨: خريطة تركيبية يقطعها صدع.

خريطة السمك:

تمثل خريطة السمك isopach map نمط سمك طبقة معينة حيث يكون هذا السمك منتظماً في توزيعه أو ربما أظهر تنامياً أو تدنياً أو حتى انعداماً في جانب من المنطقة تحت الدراسة وذلك من واقع ما تظهره خطوط الكنتور والتي سوف تتخذ أنماطاً وأشكالاً حسب طبيعة صخر الخزان وبيئته الترسيبية، وهي أمور لا بد من إدراكها جيداً خاصة عند استكشاف وتنمية حقول البترول حيث إن عدم المعرفة الجيدة بالصخر المعني قد يؤدي إلى حفر آبار جافة دون العثور على البترول وفي ذلك خسارة مالية كبيرة.

وفي خرائط السمك هناك خريطة السمك الإجمالي أو الكلي gross thickness للطبقة الصخرية دون النظر إلى خصائصها البتروفيزيائية والليثولوجية ونوع ما قد تحتويه من موائع بداخلها (شكل ٧-٩)، وهناك أيضاً خريطة السمك الفعال للطبقة المغلة pay zone حيث تتعامل الكنتورات مع بيانات السمك المغل والمنتج net pay للبترول أو الغاز الطبيعي وهو ذلك السمك الذي يدخل في حساب التقدير الحجمي للاحتياطيات البترولية.

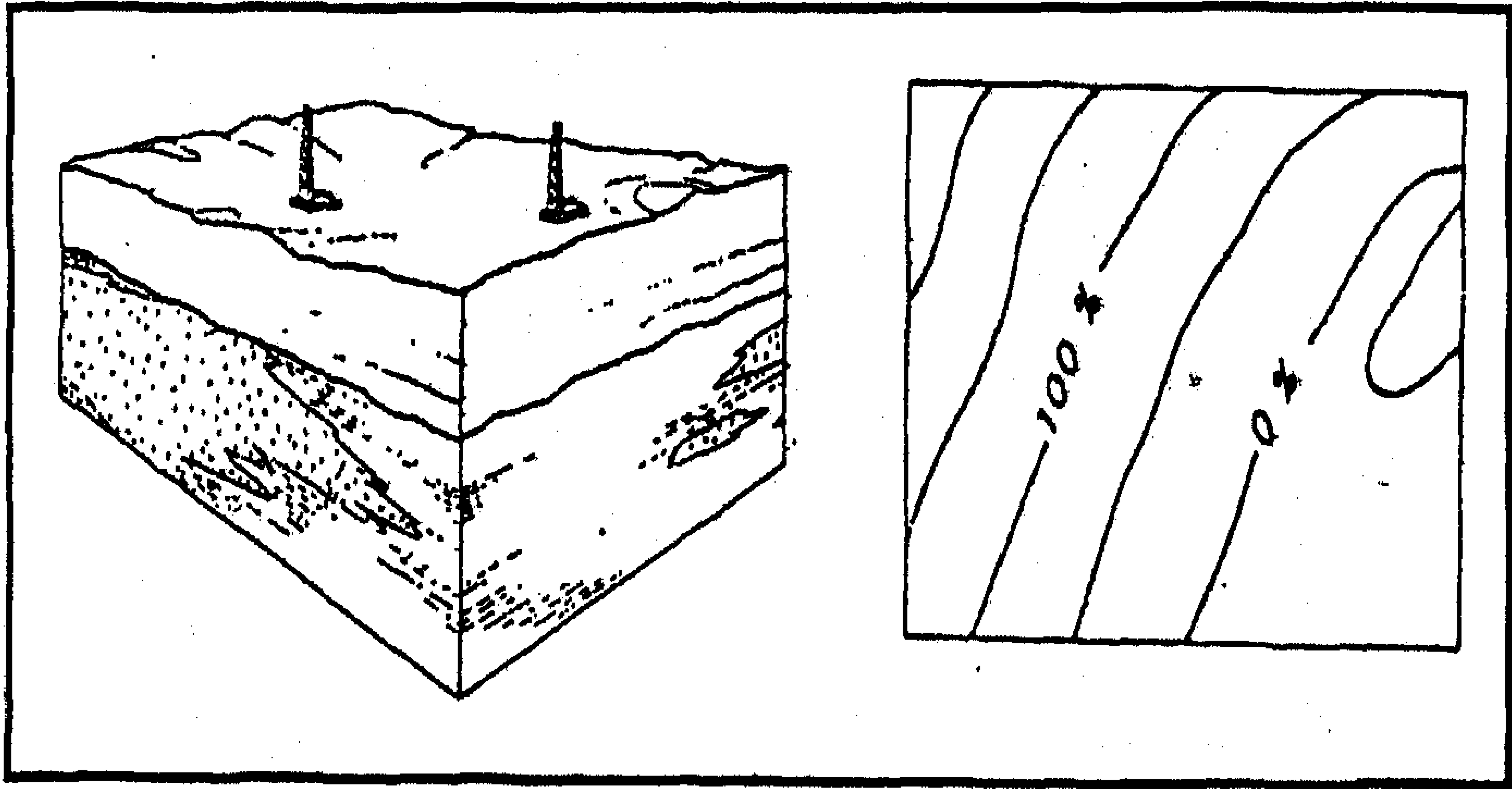


شكل ٧-٩: نماذج لخرائط سمك.

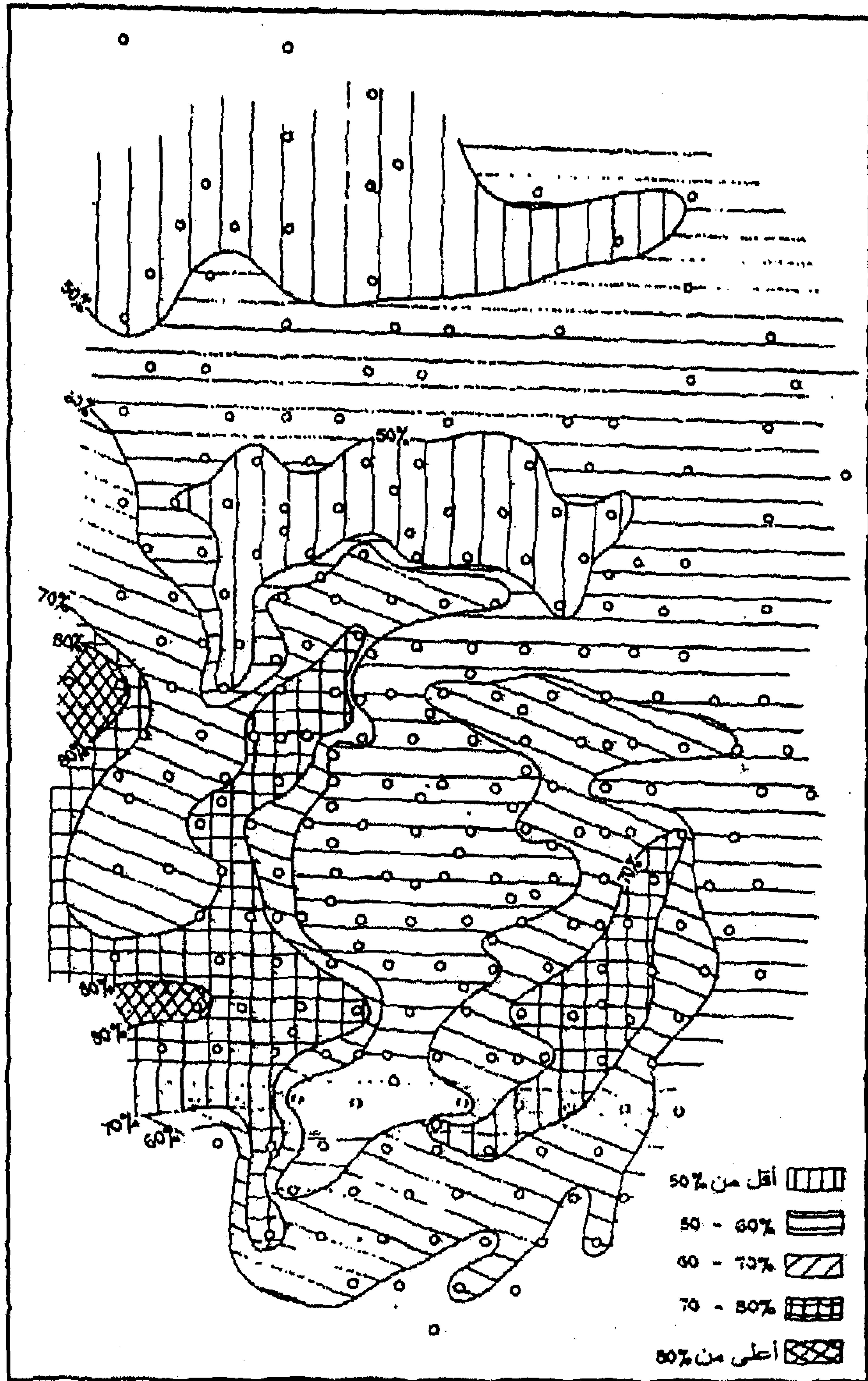
خريطة السحنة:

خريطة السحنة facies map هي نوع من الخرائط التي تستخدم للتعرف على مدى التباين في التغيرات السحنية للصخور ومعدل هذه التغيرات والتي تعتمد على الظروف الفيزيائية والبيئات الترسيبية المؤثرة، فقد يعتري التكوين الصخري الواحد تغيرات سحنية وليثولوجية تؤدي إلى عدم تجانسه على طول امتداده، ويمكن توضيح ذلك من

خلال التحاليل الليثولوجية المختلفة فهناك مثلاً تكوين من الحجر الرملي يعتريه تغير سحني إلى الطفل والحجر الجيري والمتبخرات (شكل ٧-١٠)، وعليه كان من الضروري للوصول إلى المعرفة الجيدة عمل نوع من الخرائط التي تجسد ذلك التغير على أساس كمي، ومن ثم كانت خرائط السحنة بأساليبها المختلفة فهناك خريطة النسبة ratio map وخريطة النسبة المئوية percentage وغيرهما، وفي أي من هذين الأسلوبين يتم حساب نسبة مكون صخري معين (مثلاً حجر رملي) بالنسبة لباقي المكونات الصخرية لتكوين ما، ثم توقع هذه النسبة على الخريطة ويجري الحساب لنفس المكون الصخري في موقع جديد وهكذا، وبعد ذلك تتم كنترة contouring القيم الناتجة تماماً كما هو الحال في خريطة كنتورية أخرى وتفسير الخريطة المستنبطة على ضوء ذلك، ويبين الشكل ٧-١١ خريطة توضح نسبة توزيع الحجر الرملي إلى الطفل في أحد الخزانات البترولية وقد دلت النتائج أن الآبار التي حفرت في المواقع ذات النسبة العالية من الحجر الرملي كانت أفضل كثيراً في إنتاجيتها من تلك الطفلية.



شكل ٧-١٠: خريطة نسبة لتكوين من الحجر الرملي والطفل.



شكل ٧-١١: خريطة سحنة ونسب توزيع داخل خزان بترولي مكون من الحجر الرملي والطفل.

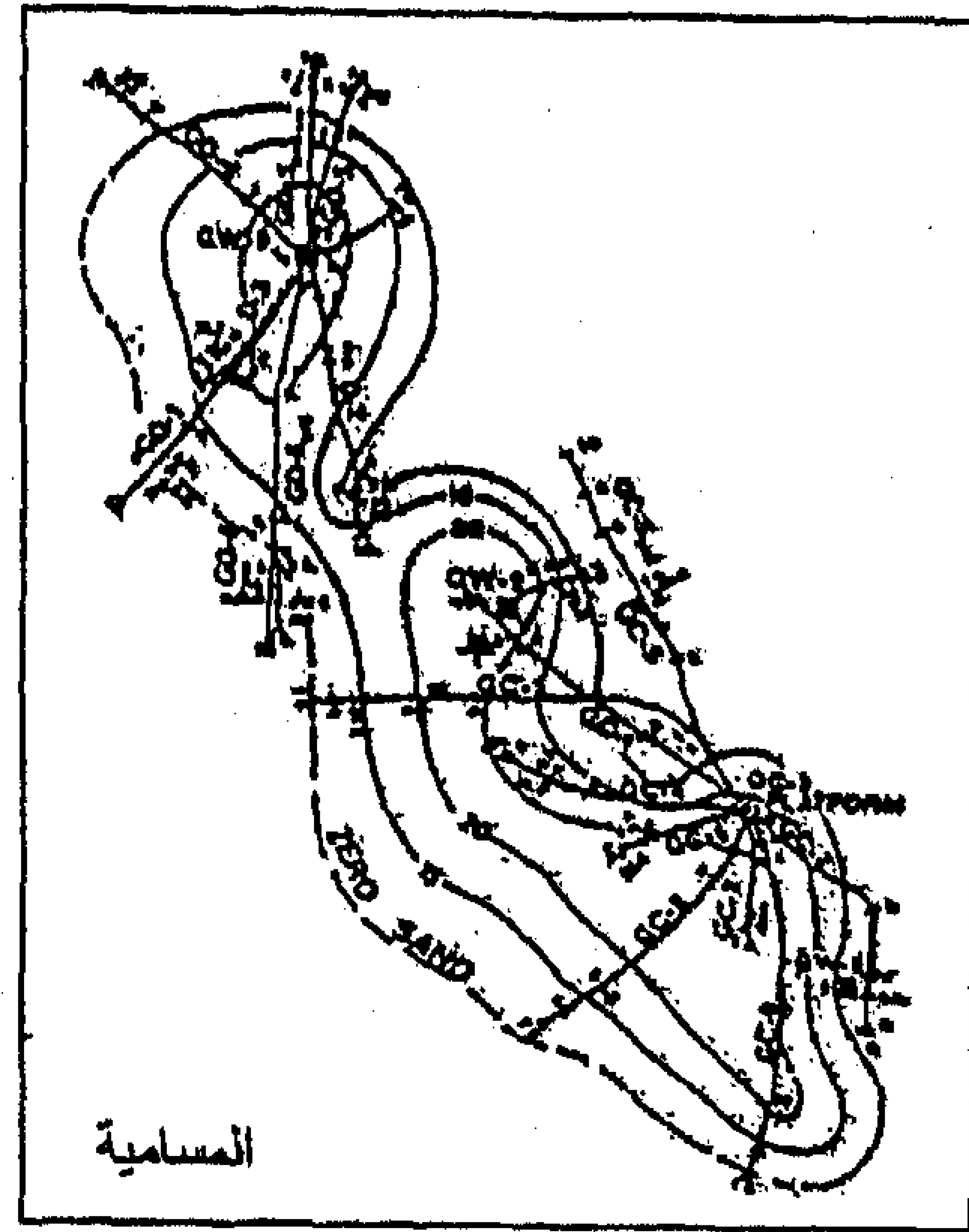
خرائط أخرى:

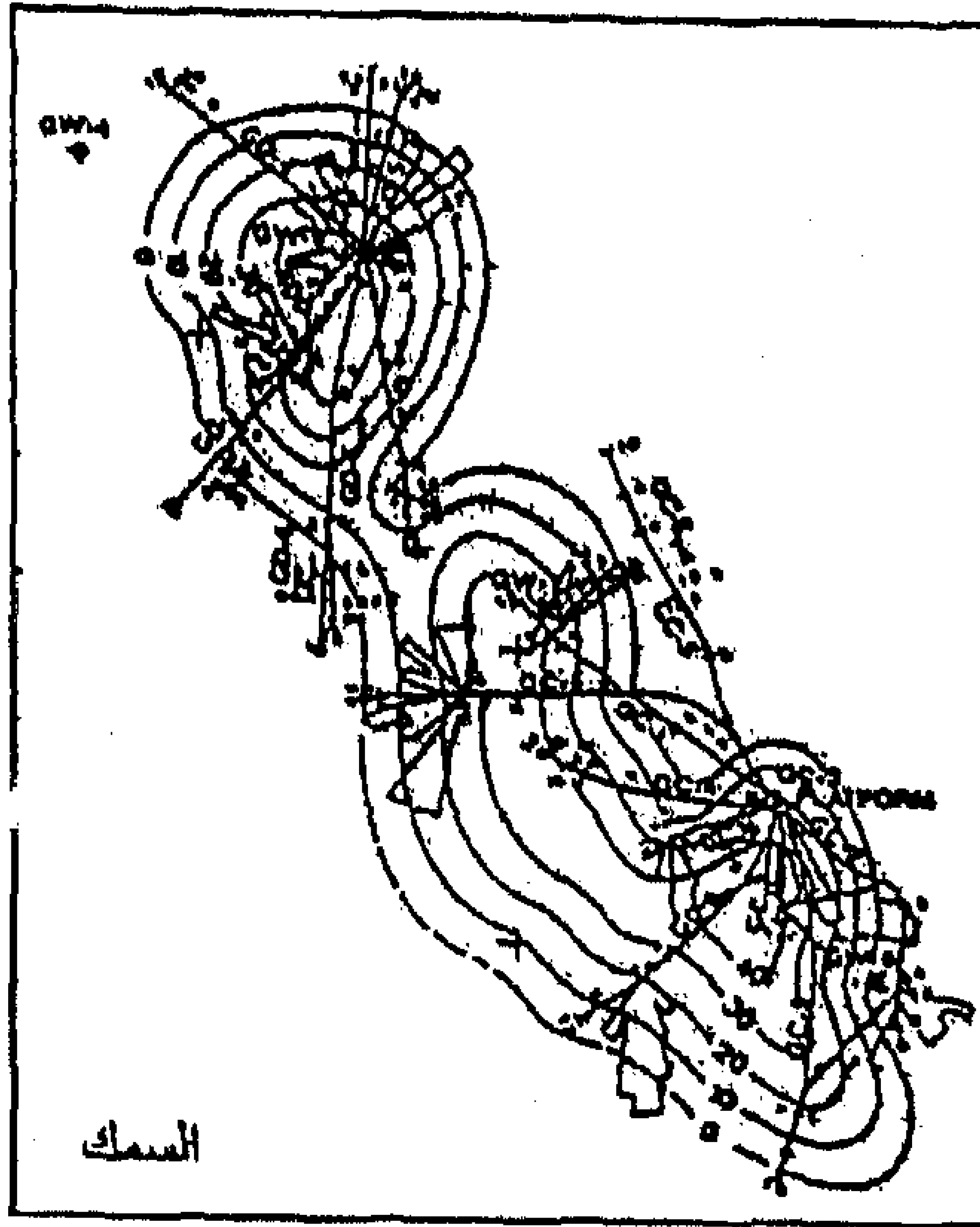
هناك عدد من الخرائط الكنتورية الأخرى التي يتعامل معها جيولوجي الإنتاج والتنمية ومهندس الخزانات بصفة خاصة وذلك ضمن المادة المطلوبة لعمل نمذجة ومحاكاة للخزان الجوفي reservoir modelling and simulation وأغلب هذه الخرائط

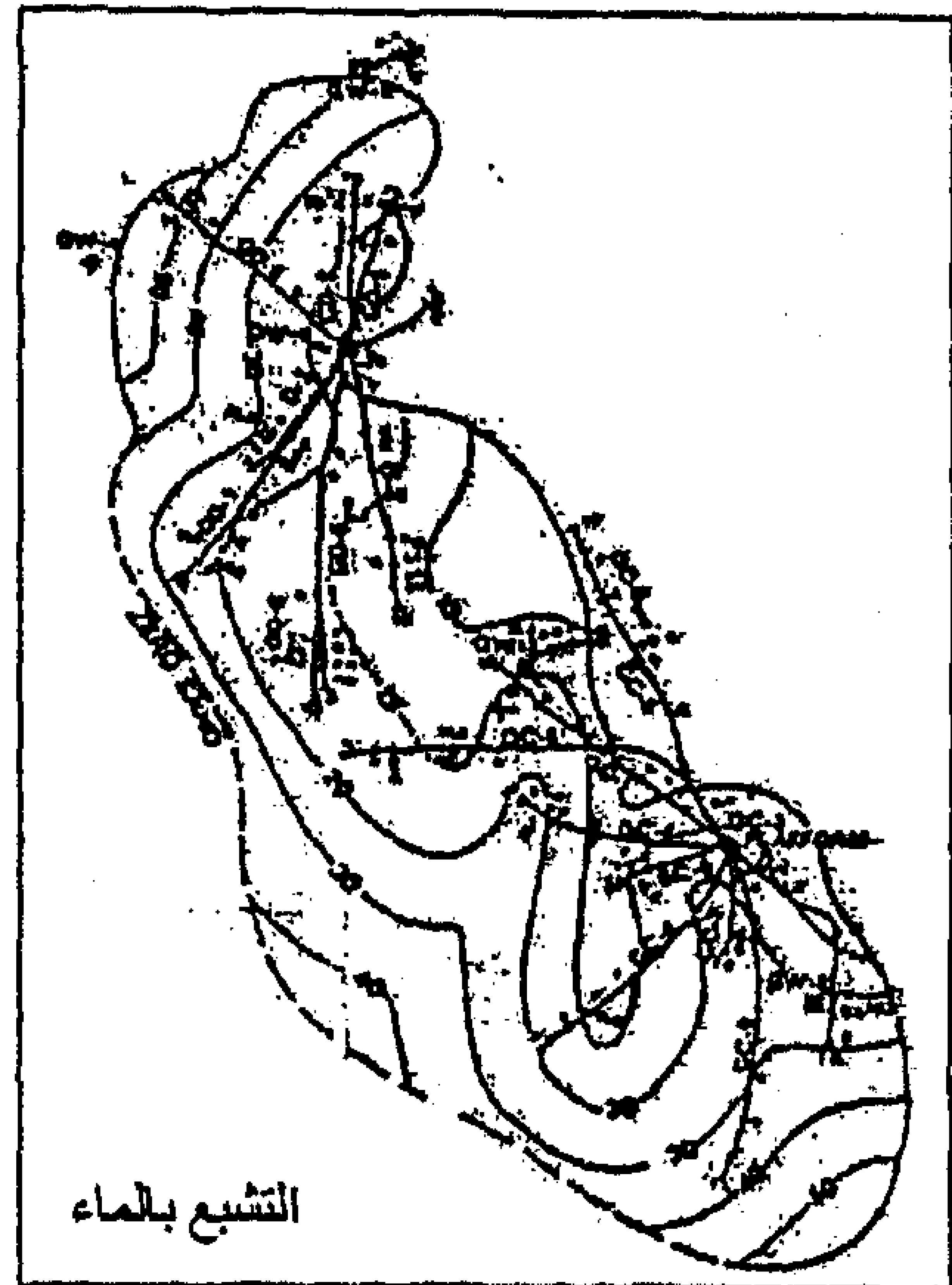
يتعلق بدراسة الخصائص البتروفيزيائية والخزانية للنطاق المنتج للزيت أو الغاز وتشمل خرائط للمسامية والنفاذية والتشبع بالماء وضغط وحرارة الخزان وغيرها، وبالطبع فإنه لعمل هذه الخرائط لا بد من وفرة البيانات المتصلة بالموضوع سواء كان ذلك عن طريق التحليل المعملي للعينات اللبية cores أو تفسيرات تسجيلات الآبار well logs أو القياسات الحقلية ذات الصلة، ثم توقيع هذه البيانات ورسم الخريطة الكنتورية وقراءتها واستنتاج الوضع الجيولوجي والخزاني واستخدامها أيضاً في برنامج الحاسوب المعد لهذا الغرض، ويبين الشكل ٧-١٢ مثالاً لعدد من خرائط السمك والمسامية والنفاذية والتشبع بالماء في خزان الحجر الرملي "شجر" Shagar sandstone والمنتج في حقل جيسوم الشمالي بمنطقة خليج السويس حيث يلاحظ تباين هذه الخصائص على امتداد الحقل الأمر الذي ينبغي أخذه في الاعتبار أثناء عملية التنمية.

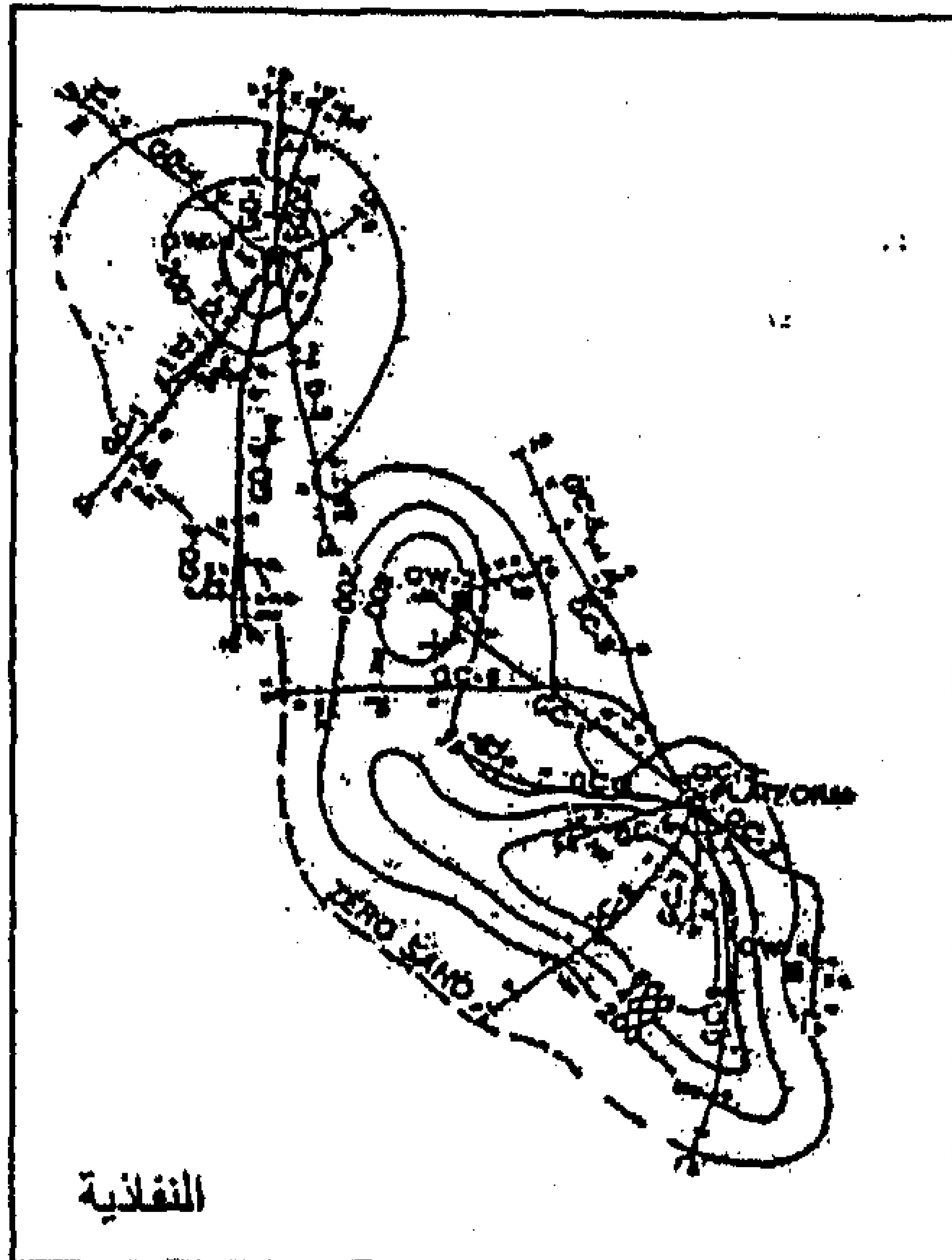
القطاعات الجيولوجية:

القطاع الجيولوجي geological section هو شكل يمثل قطاعاً رأسياً في التتابع الصخري والتركيب الجيولوجي للمنطقة التي تمثلها الخريطة الجيولوجية في اتجاه معين، وهو من الملحقات المفيدة لهذه الخريطة، وفي المناطق ذات البنية التركيبية المعقدة يكون من اللازم رسم عدة قطاعات كهذه بهدف الوصول إلى فهم أفضل للوضع الجيولوجي والهندسي خاصة في الدراسات التحتسطحية حيث لا تتوافر المعلومات بشكل مرئي وواضح، ونادراً ما ترسم هذه القطاعات بمقياس الخريطة بالنسبة الطبيعية إذ إنها ستظهر في هذه الحالة مسطحة تقريباً وليس لها معنى، وفي العادة يكبر المقياس الرأسي ثلاث مرات أو أكثر بالنسبة للمقياس الأفقي حتى تظهر التفاصيل الجيولوجية بوضوح، ويتم رسم هذه القطاعات على ورق مربعات وذلك بإسقاط إرتفاعات جميع نقط الكنتور التي يمر بها القطاع المطلوب رسمه رأسياً من أماكنها قياسياً على المحور الرأسي ثم توصل النقط الناتجة ببعضها البعض فتعطي التفاصيل الطبوغرافية - إن وجدت - على خط البروفيل، أما التفاصيل الجيولوجية داخل هذا الخط فترسم بواسطة توقيع سطوح التطبق المار بها القطاع واستكمال بقية المعالم التحتسطحية مع الأخذ في الاعتبار اتجاه ميل الطبقات ومقداره وكذا أسطح اللاتوافق والصدوع إذا ما وجدت، وتنسب جميع إرتفاعات القطاع الجيولوجي والأعماق إلى منسوب سطح البحر على غير قطاعات المضاهاة التي قد لا تتطلب ذلك عند رسمها.





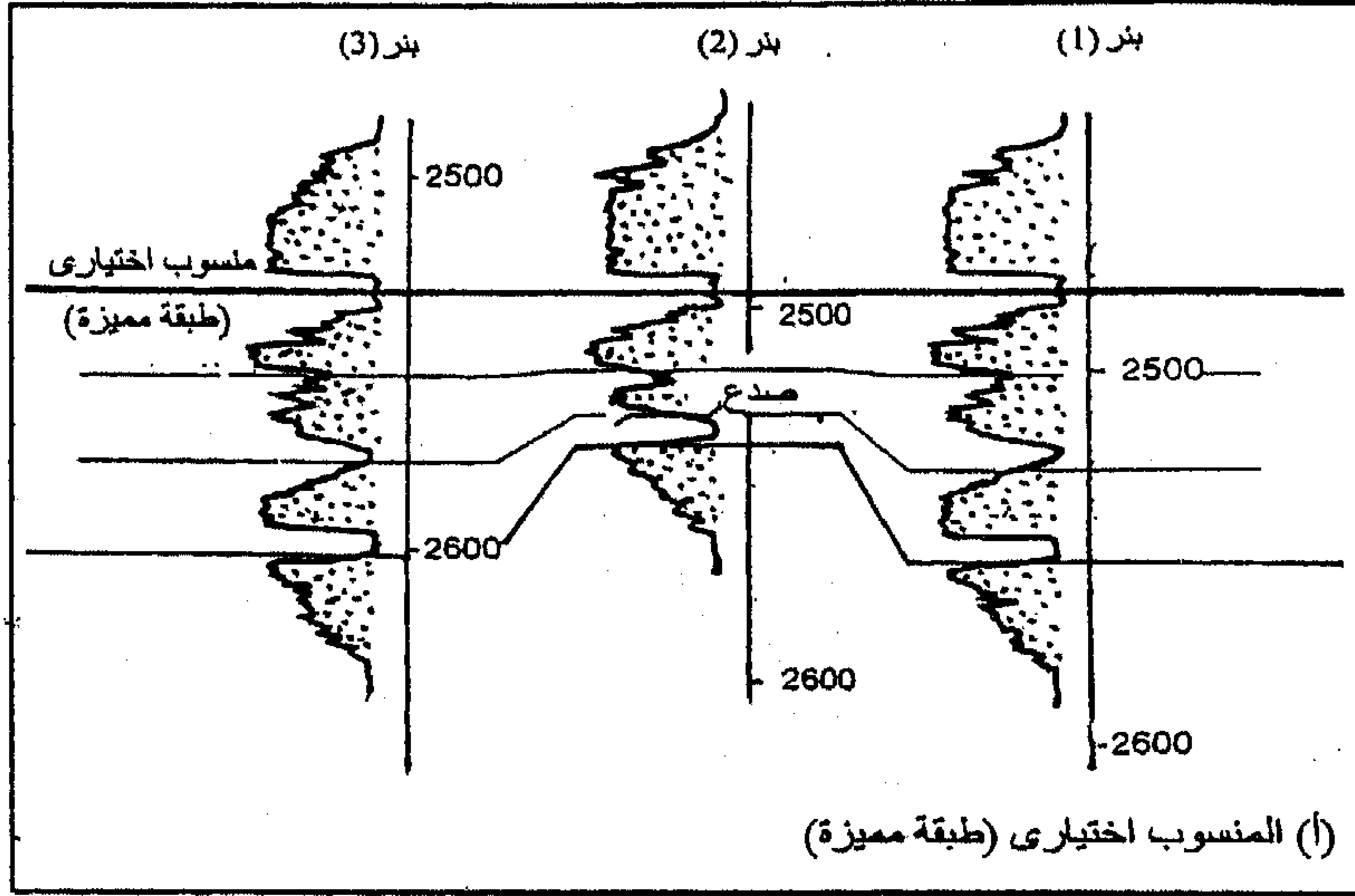


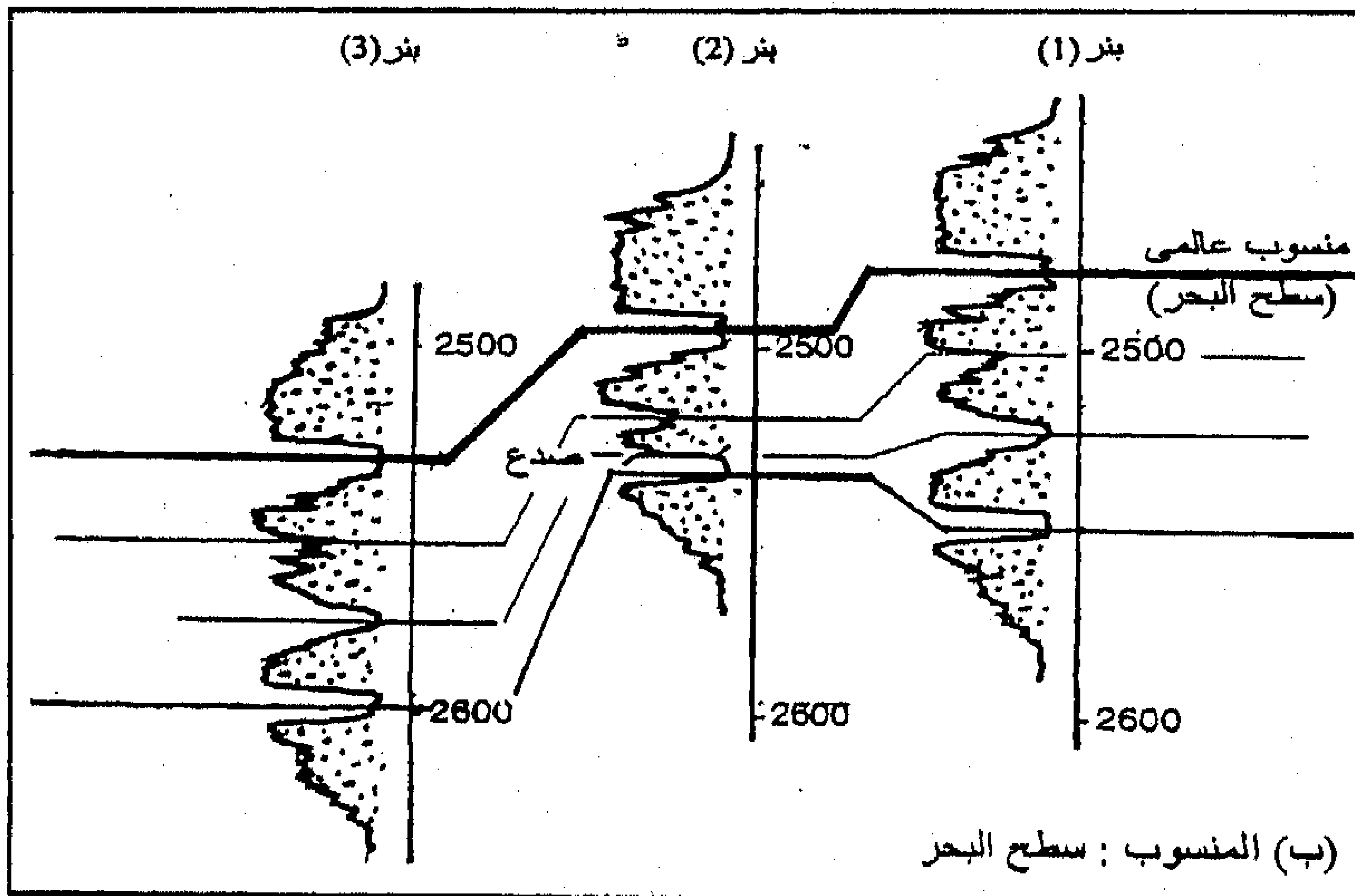


شكل ٧-١٢: مجموعة خرائط توضح توزيعات السمك والمسامية والنفاذية والتشبع بالماء لخزان شجر بحقل جيسوم الشمالي في خليج السويس.

وهنا علينا أن نفرق بين ما يعرف بالقطاع الجانبي الطبقي stratigraphic cross section والقطاع الجانبي التركيبي structural cross section واللذين يجري رسمهما في تتابع رأسي باستخدام البيانات المتوافرة (تسجيلات الآبار مثلاً كما سنري فيما بعد) ومضاهاة ومقارنة الوحدات الصخرية المتماثلة على امتداد المنطقة تحت الدراسة، وفي

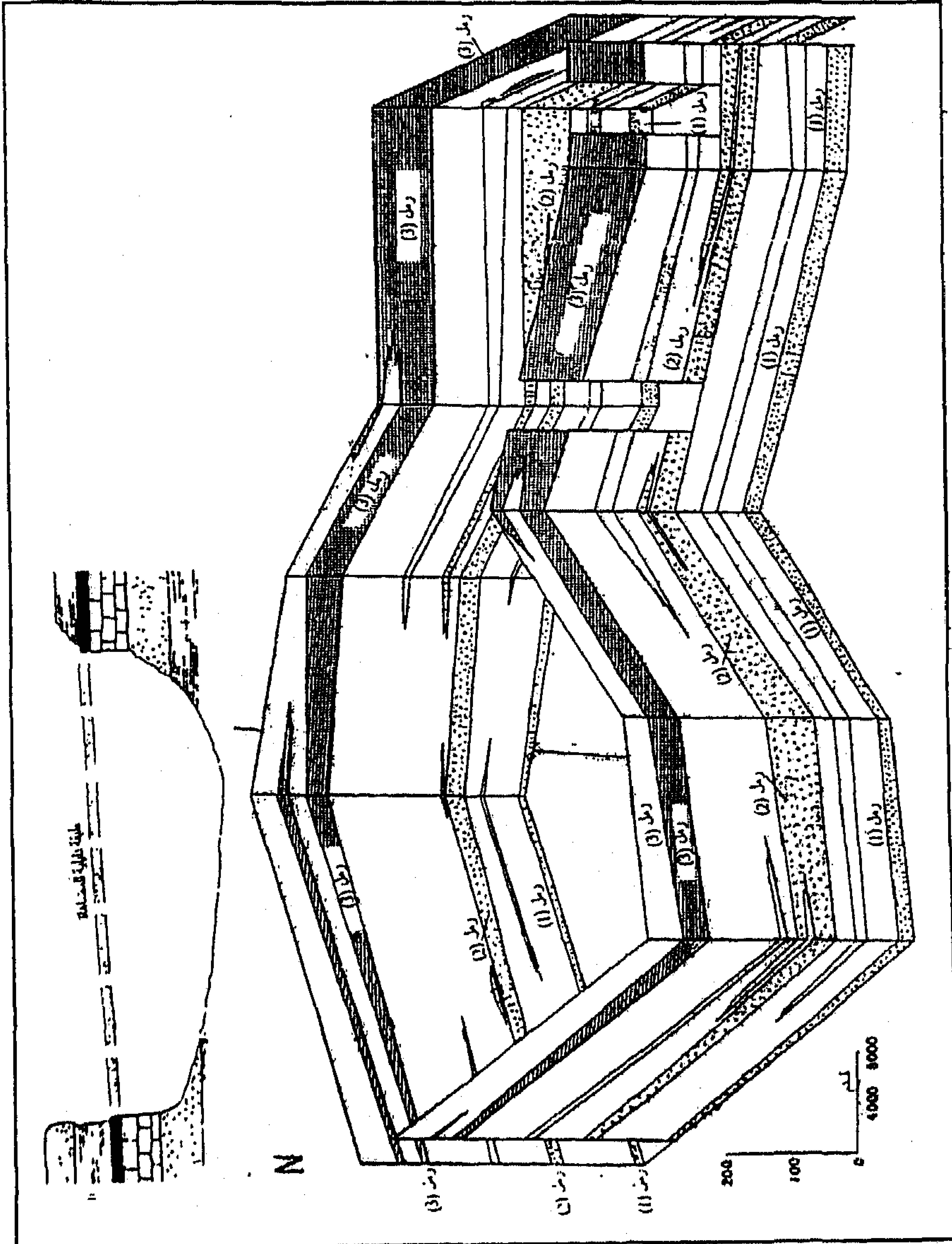
القطاع الطبقي يجري اختيار طبقة مميزة (دليلية) marker bed لها امتداد واضح على طول المنطقة لتكون المنسوب المشترك عند مضاهاة الوحدات الصخرية المتماثلة، أما في القطاع التركيبي يكون سطح البحر هو المنسوب المستخدم بعد التعامل مع البيانات المتوافرة سلباً أو إيجاباً بالنسبة لأعماقها أو ارتفاعاتها عند هذا السطح مما يعطي صورة حقيقية للمقطع الجيولوجي والبنيان التركيبي هناك، وهو الأمر الذي نلتزم به في جميع القطاعات الجيولوجية عند تحضيرها (راجع شكل ٧-١٣).





شكل ٧-١٣: مضاهاة بين الآبار باستخدام التسجيلات الكهربائية.

هذا ويمكن تمثيل التكوينات الصخرية والتراكيب الجيولوجية بالمنطقة تحت الدراسة بواسطة ما يعرف بالخرائط السياجية fence (panel) maps وذلك عن طريق الإسقاطات الأيسومترية isometric projections المجسمة حيث يمكن ملاحظة التغيرات في السحنات الصخرية على هذه الخرائط أو القطاعات وكذا التباينات المختلفة في سمك الطبقات وامتداداتها الجانبية كما هو موضح بالشكل ٧-١٤ والذي يمثل قطاعاً سياجياً في منطقة منتجة للبترول ذات تعددات لطبقات من الحجر الرملي متباينة السمك والامتداد.

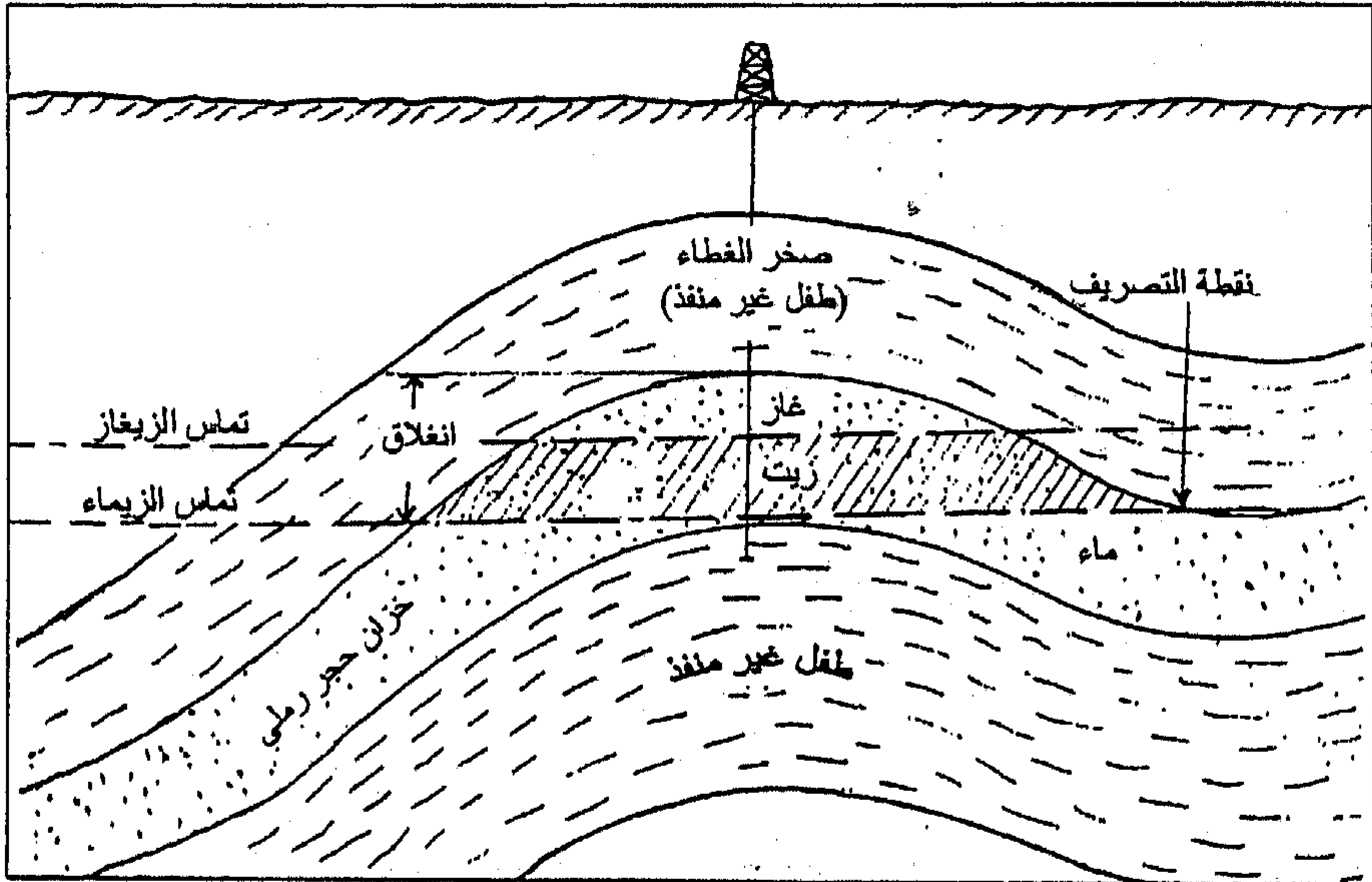


شكل ٧-١٤: مثال للقطاعات السياجية المستخدمة في مضاهاة الطبقات ومتابعة امتداداتها الجانبية.

الفصل الثامن
المصايد البترولية

تعريف المصيدة:

تعرف المصيدة البترولية petroleum trap بأنها المنطقة العليا من الصخر الخزان التي يحتبس فيها البترول الذي هاجر إليها بعد تولده في الصخر المصدر، وفي بادئ الأمر كانت هذه المصيدة مليئة بالماء وجاء البترول من زيت وغاز ليحل محل هذا الماء، ولما كان الزيت والغاز أخف في الكثافة من الماء فإن الغاز يستقر في أعلى المصيدة يليه الزيت ثم الماء في أسفل الخزان، ويفصل بين هذه الموائع سطوح تعرف بتماس الزيت والغاز أو الزيغاز gas-oil contact وتماس الزيت والماء (الزيماء) oil-water contact وتماس الغاز والماء (الغاماء) gas-water contact في حالة عدم وجود الزيت، ويتم ملء المصيدة بالمائع حتى منسوب يعرف بنقطة التصريف spill point والتي عندها تفقد المصيدة قدرتها على احتجاز موائع إضافية بداخلها وينطلق ما يفيض من موائع إلى مسار جديد عبر الخزان الجوفي (شكل ٨-١)، ويعلو المصيدة صخر غير منفذ يعرف بصخر الغطاء seal or cap rock لمنع الموائع من التسرب.



شكل ٨-١: قطاع جانبي في مصيدة بترولية على هيئة طية محدبة يوضح صخر الغطاء في أعلى القبة يسفله الصخر الخزان ثم طبقة غير منفذة، لاحظ أيضاً تماس الزيغاز والزيماء والانغلاق التركيبي ونقطة التصريف.

أما حقل البترول field فهو يعرف بأنه المنطقة السطحية التي تعلو الطبقة أو الطبقات المنتجة من نفس المصيدة والتي تكون على شكل طية محدبة مثلا.

وعادة ما يعطي للحقل اسم جغرافي لمدينة أو مَعْلم طبوغرافي أو جيولوجي أو عَلَم مرموق فهناك حقل رأس غارب Ras Gharib نسبة لمدينة رأس غارب بخليج السويس، وحقل خليج الزيت نسبة لجبل الزيت هناك Gebel Zeit، وحقل أبو الغراديق Abu Gharadig نسبة إلى حوض أبو الغراديق، وحقل هلال Hilalنسبة إلى المهندس أحمد عزالدين هلال أحد رواد صناعة البترول في مصر، وهكذا.

أما الخزان reservoir فهو المنطقة التحتسطحية التي ينتج الزيت أو الغاز بشكل منفرد وخاص به، وألا تكون على اتصال بخزانات أخرى، أو كما يطلق عليها البعض البركة البترولية pool.

وبالنسبة للخزان الواحد تكون خصائص الزيت أو الغاز بداخله واحدة ولكنها قد تختلف بالنسبة للخزانات أو البرك الأخرى إذا ما وجد بالحقل الواحد أكثر من خزان ؛ فمثلا قد يحتوي أحد الخزانات على زيت له جودة (كثافة) تبلغ ١٢ درجة بينما في آخر تصل جودته إلى ٣٤ درجة، وعادة ما تعطي تسمية الخزانات نسبة إلى اسم التكوين الجيولوجي، فهناك مثلا خزان الحجر الرملي النوبيNubia Sandstone reservoir وخزان الحجر النلليبوري Nullipore Limestone reservoirفي مصر وخزان النطاق العربي Arab zone بالسعودية وغيرهم.

تصنيف المصايد البترولية:

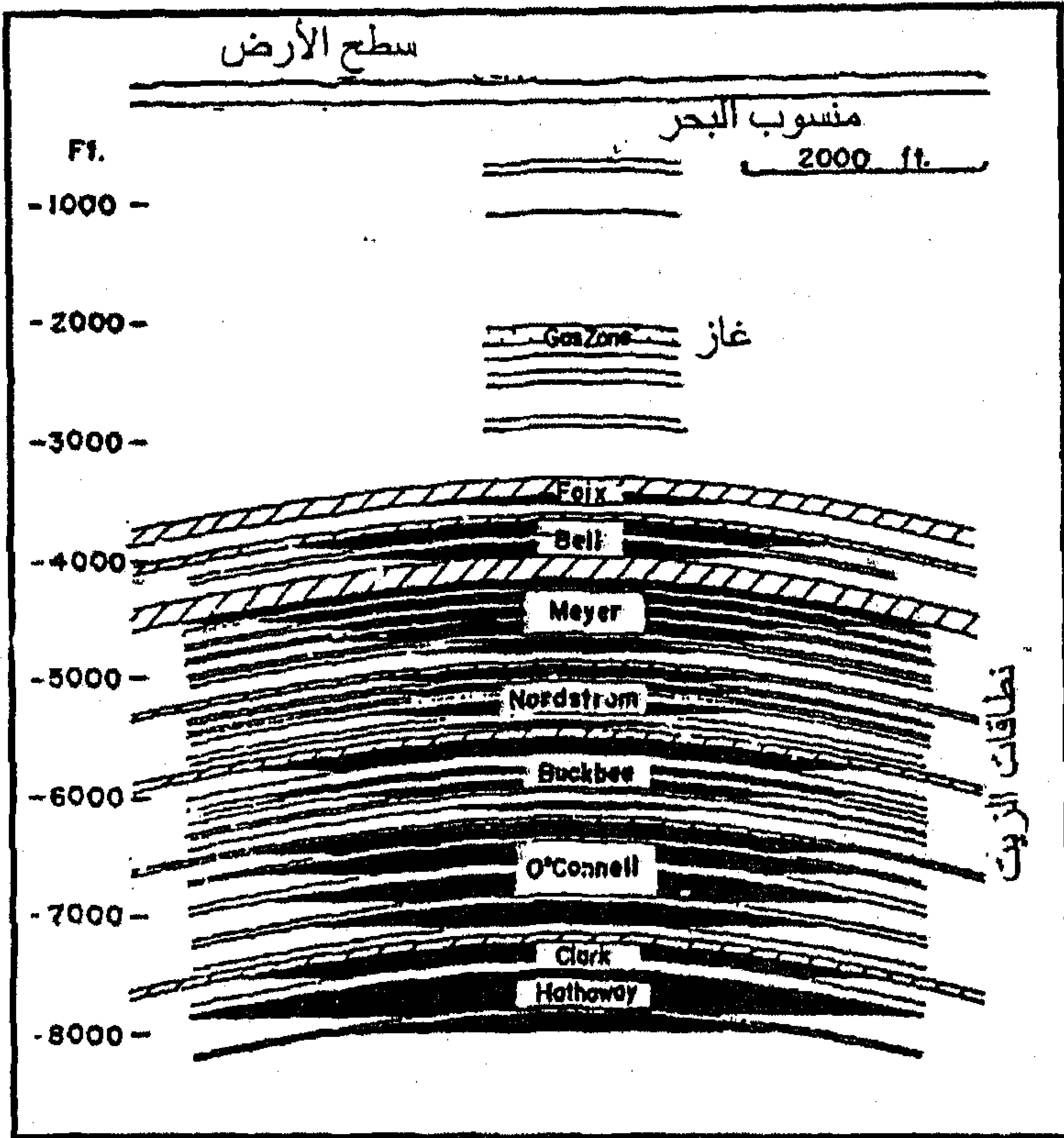
تتنوع المصايد البترولية وتتخذ أشكالاً متعددة تعتمد في المقام الأول على ظروف نشأتها وأصولها وبنيتها الهندسية ولا يوجد حتى الآن تقسيم واحد يغطي جميع أنواع المصايد نظراً للتداخل العضوي للعناصر المكونة للمصيدة الواحدة وتعقد الظروف الجيولوجية المكونة للمصيدة في معظم الحالات، غير أننا نرى أن التصنيف classification الذي قدمه ليفورسن (A.I. Levorsen 1985) يتميز ببساطته وهو مفيد من الناحية العملية سواء للاستخدامات الجيولوجية أو الهندسية على حد سواء، وحسب هذا التصنيف هناك ثلاثة أنواع رئيسة من المصايد البترولية وهي المصايد التركيبية والمصايد الطبقية والمصايد المختلطة (المشتركة)، وفيما يلي شرح مفصل لهذه المصايد.

(١) المصايد التركيبية:

المصايد التركيبية structural traps هي المصايد التي تكونت أساساً نتيجة الإجهادات التي تعرضت لها الصخور والتي تسببت في طيها أو تصدعها أو كليهما معاً لكل من الطبقات الخازنة واللاحمة على حد سواء وتشمل:

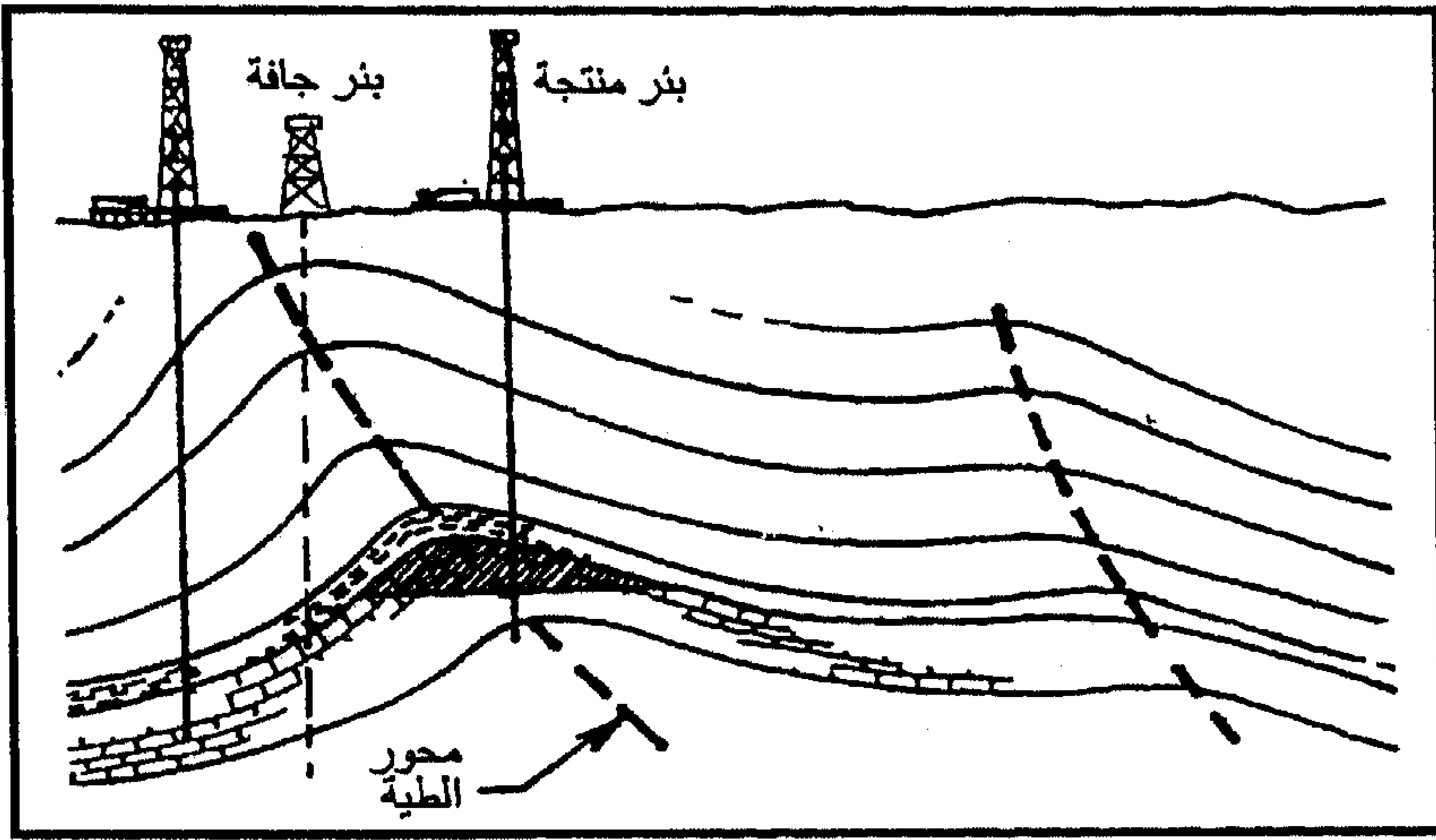
الطيات والقباب anticlines and domes:

من مميزات هذه المصايد أنها غالباً ما تحتوي على نُطُق متعددة ومنتجة، وعلى سبيل المثال فإن حقل سانتافي سبرنجز Santa Fe Springs بالقرب من لوس أنجلوس بكاليفورنيا يتكون من ٢٥ نطاقاً منتجاً للزيت جميعها من الحجر الرملي الذي تفصله طبقات من الطفل (شكل ٨-٢).



شكل ٨-٢: قطاع في حقل ينابيع سانتافي يوضح العديد من النطق البترولية يفصل بينها طبقات الطفل غير المنفذة في تركيب انثنائي واحد.

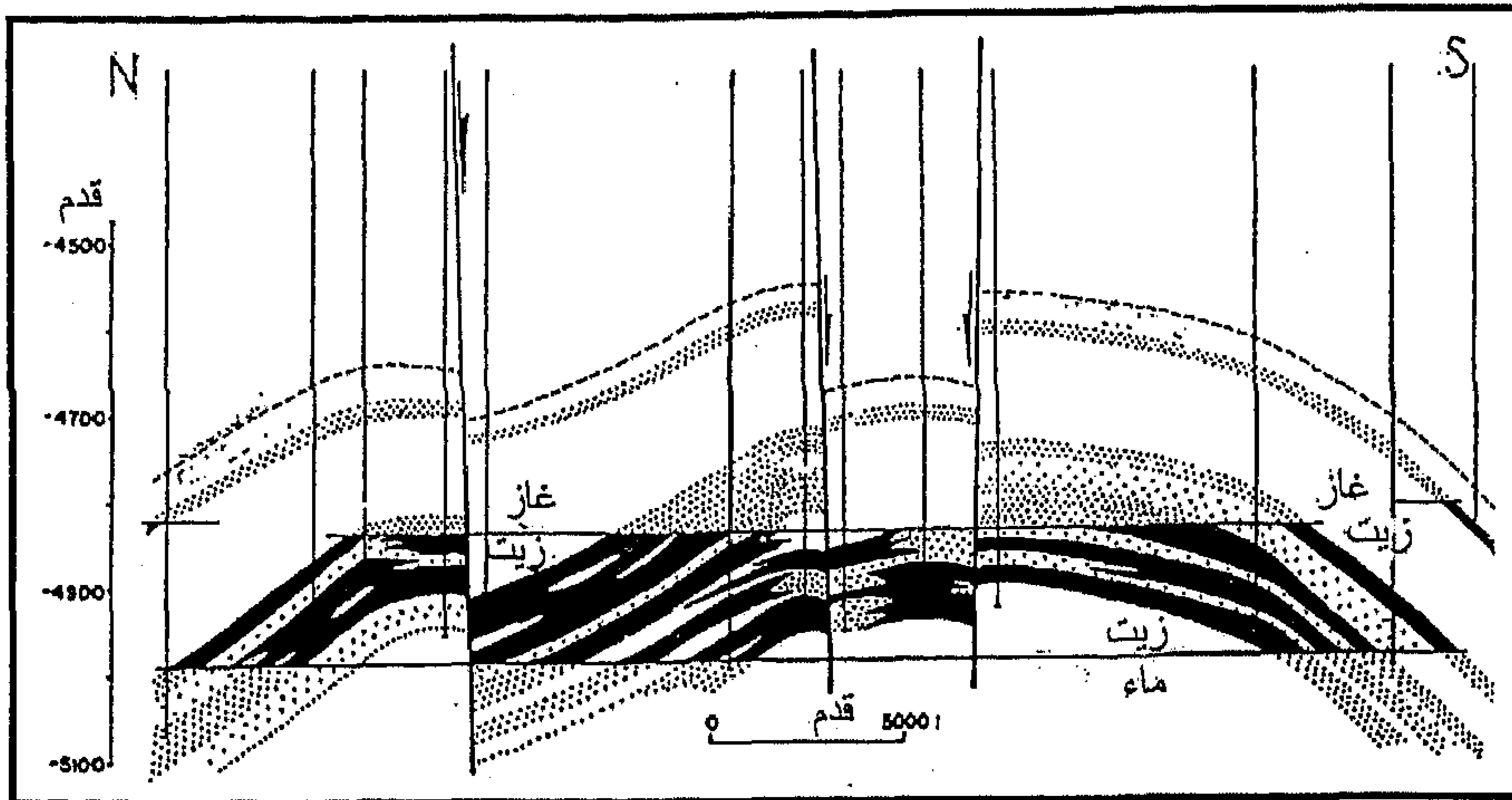
ومن المشاهدات الحقلية نجد أن أغلب الطيات المحدبة غير متماثل asymmetrical ويزداد انحداره في جانب عن الآخر وهو ما يعني أن قمة التراكيب سوف ترتحل مع ازدياد العمق، فالبئر التي حفرت على التركيب عند قمة الطية على السطح تكون قد ارتحلت عن التركيب off structure عند عمق الطبقة الخازنة للبترول كما هو موضح بالشكل ٨-٣، لذا وجب أخذ هذا الأمر في الاعتبار حتى نتجنب اختراق طبقة الزيت عند عمق يتجاوز تماس الزيت والماء حيث يعثر على الطبقة حاملة للماء دون الزيت، وتكون البئر التي تم حفرها بئراً جافة dry well.



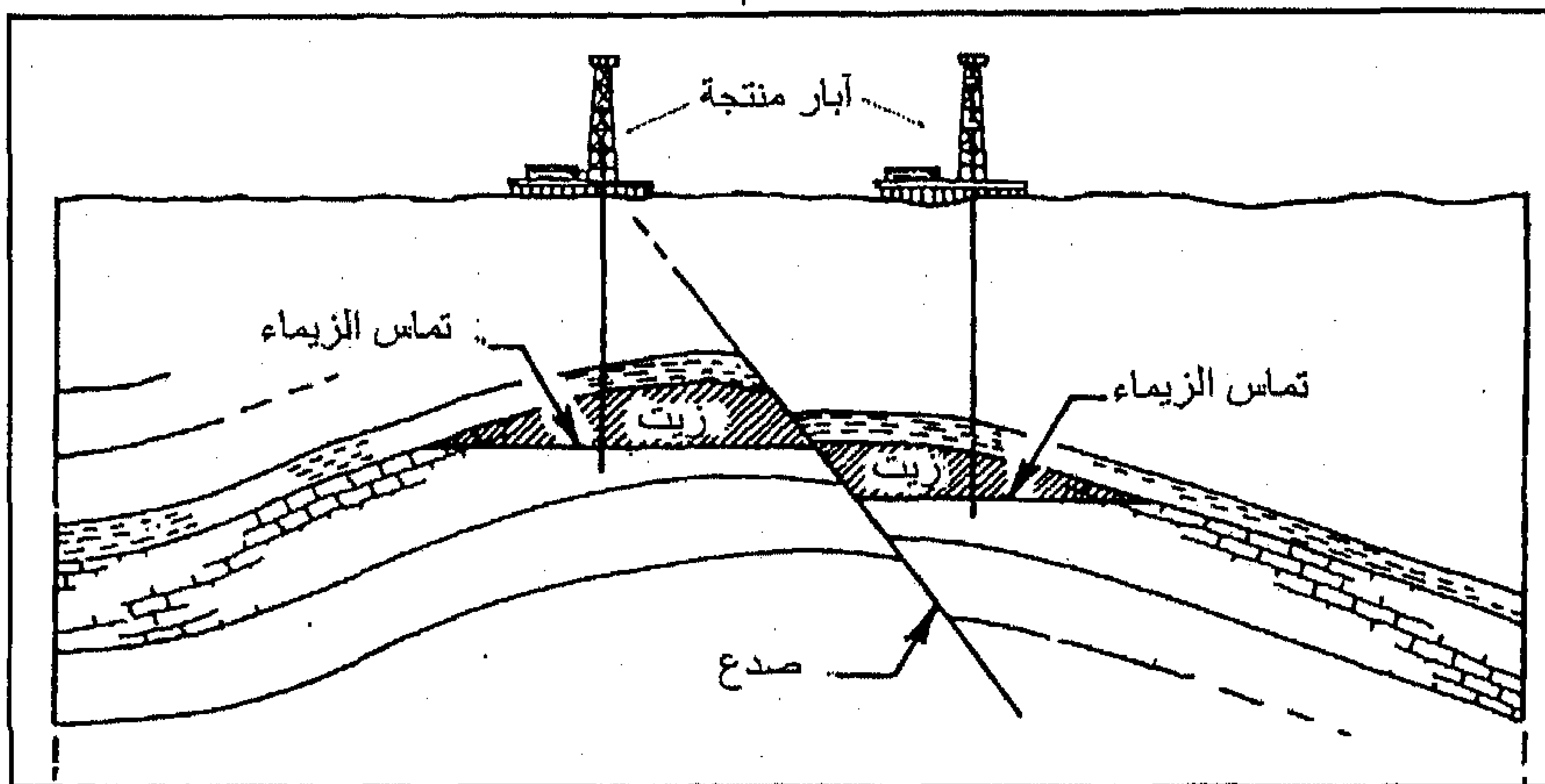
شكل ٨-٣: ارتحال الطية البترولية مع العمق.

كذلك فإنه في أحوال غير قليلة تكون هذه الطيات أو القباب مقطوعة بعدد من الصدوع التي تعمل في بعض الأحيان كحواجز تمنع انسياب الموائع من جهة لأخرى، وتسمى الصدوع في هذه الحالة بالصدوع المانعة للتسرب sealing faults، ويؤدي ذلك إلى تقسيم التركيب الجيولوجي للحقل إلى أقسام (compartments, segments) منفصلة تحتاج تنميتها إلى أساليب خاصة ويعامل كل قسم فيها كوحدة قائمة بذاتها، وفي هذا السياق ينبغي معرفة ما إذا كان الصدع لاحماً من عدمه، فقد نجد أن تماس الزيت والماء (الزيماء) أو الغاز والزيت (الزيغاز)عند مستوى واحد على جانب التركيب الصدعي (شكل ٨-٤)، أو يكون أي من هذين التماسين على مستويين مختلفين لنفس الخزان الجوفي على كل جانب (شكل ٨-٥)، وفي هذه الحالة يكون الصدع لاحماً ويمكن التأكد من ذلك

عند قياس ضغط الخزان عند عمق واحد على جانبي التركيب والذي سوف يكون متبايناً وهو ما يعني أن الصدع لاحم. وفي مناطق الدلتا والمناطق الساحلية يغلب على الصدوع أن تكون لاحمة نظراً لوجود الطفل اللين تحت السطح وعندما يتحرك الصدع فإن هذا الطفل يعمل كمادة دبقة smearing تكسو وتفترش مستوى الصدع مكونة بذلك طبقة لاحمة.



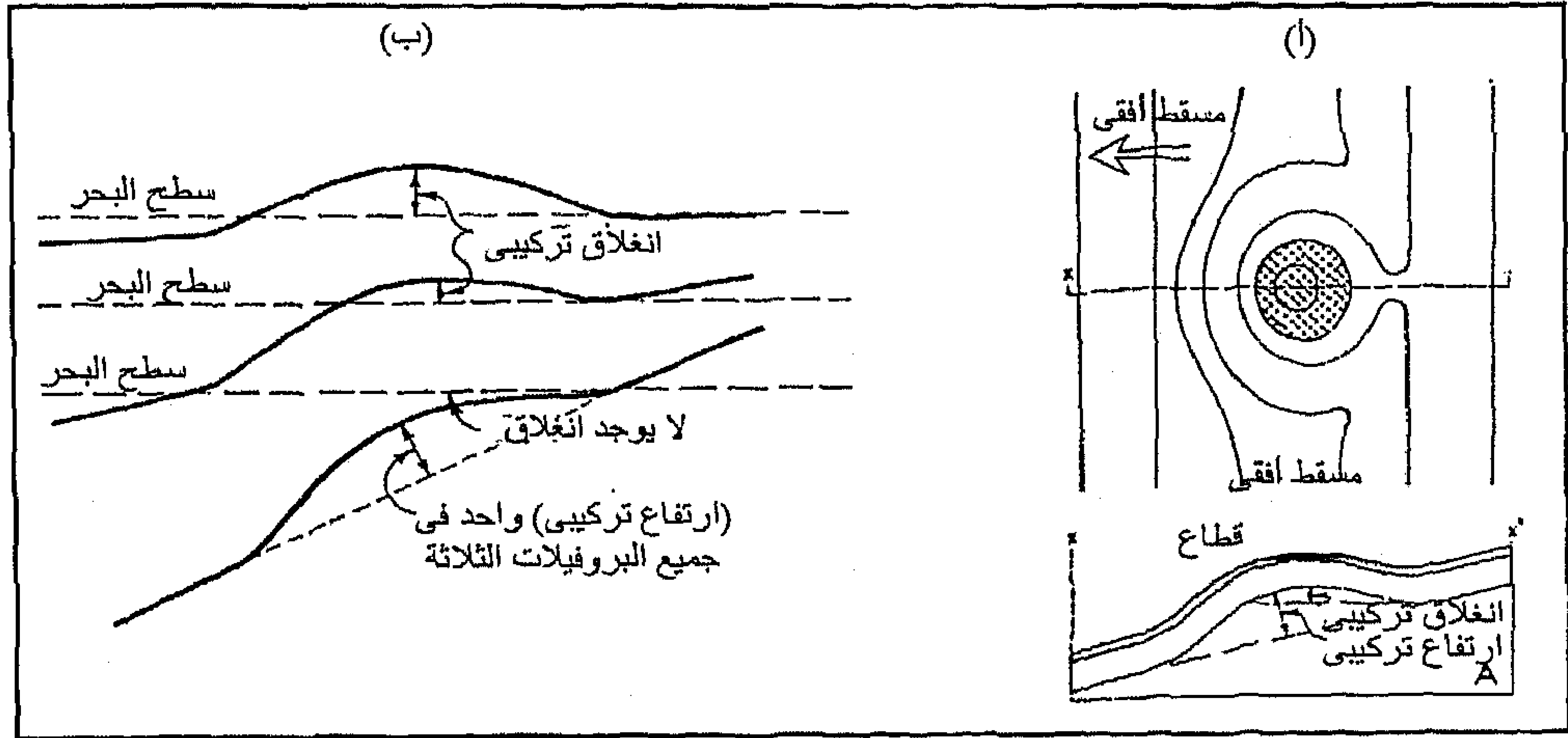
شكل ٨-٤: قطاع جيولوجي في حقل كونرو بتكساس يوضح تماس الزيغاز والزيماء المشتركين داخل الحقل مما يشير إلى اتصال قائم بين النطق المنفذة والمنتجة هناك.



شكل ٨-٥: قطاع جانبي يوضح وجود صدع لاحم وفاصل لتماسي الزيماء عند كل جانب.

وفيما يتعلق بمصايد الطيات المحدبة هناك مصطلحان لهما أهميتهما الخاصة ويجب التفرقة بينهما وهما الانغلاق التركيبي والارتفاع التركيبي.

ويعرف **الإنغلاق التركيبي** structural closure بأنه المسافة الرأسية من أعلى نقطة إلى أقل الكنتورات المغلقة (شكل ٨-٦) وهو يتراوح بين بعض الأمتار إلى مئات الأمتار، ويوصف الانغلاق التركيبي بالنسبة لمنسوب سطح الأرض، وتتوقف قدرة مصيدة الطية المحدبة على احتباس الزيت والغاز على هذا الانغلاق بالإضافة إلى سمك ومسامية وضغط الخزان الجوفي وظروف سريان الموائع بداخله.



شكل ٨-٦: (أ) رسم تخطيطي يوضح الفرق بين الانغلاق التركيبي والارتفاع التركيبي.
(ب) بروفيلات توضح كيف يكون للارتفاع التركيبي الواحد قيم مختلفة من الانغلاقات التركيبية تبعاً للميل الإقليمي.

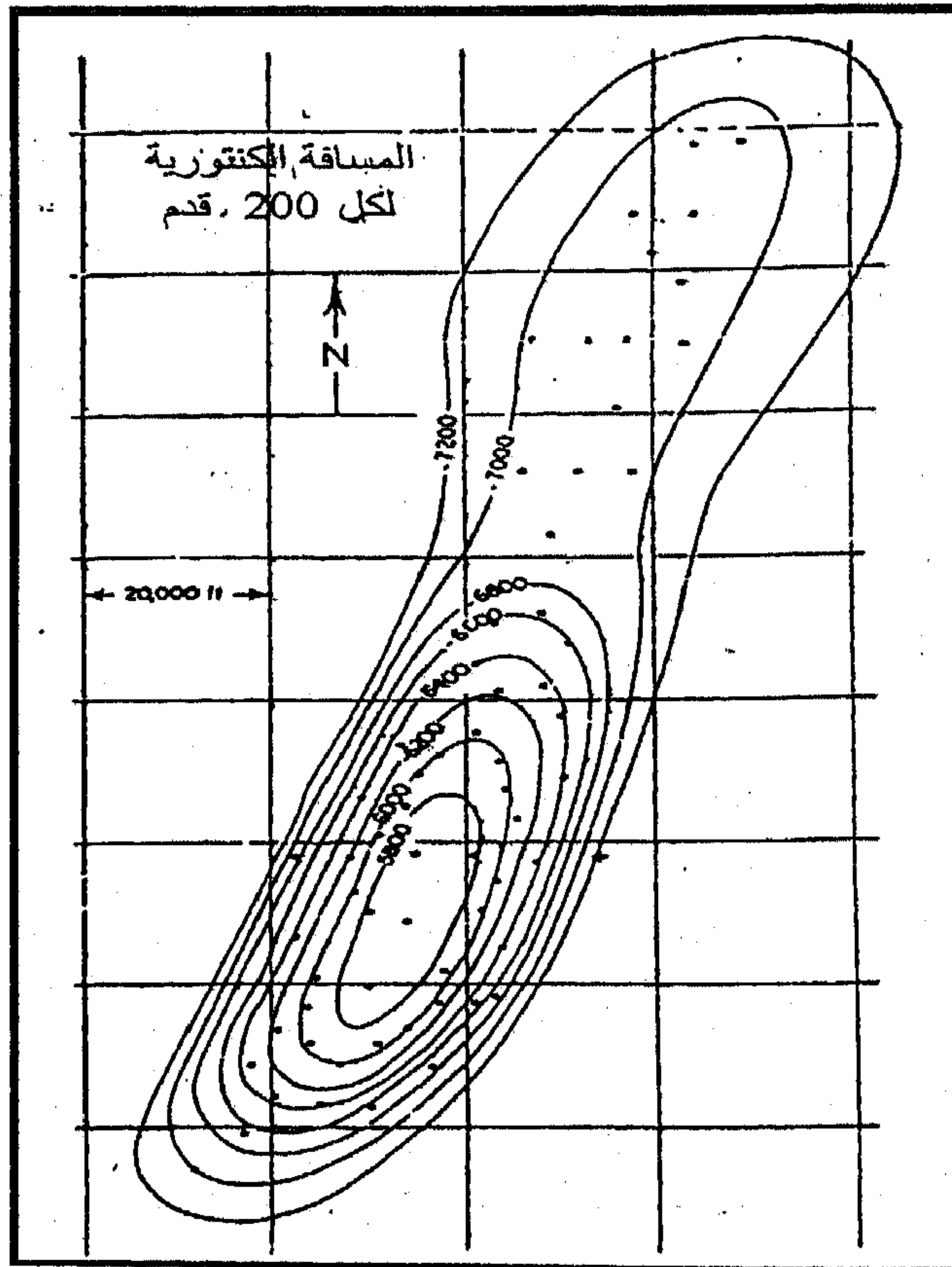
أما **الإرتفاع التركيبي** structural relief فيكون عادة أكبر من الانغلاق التركيبي وهو الارتفاع الذي تصل إليه الطية المحدبة فوق الانحدار الإقليمي (شكل ٨-٦)، وتقاس قيمته من أعلى نقطة إلى مسقط الانحدار الإقليمي في أسفل، ويوضح الشكل ٨-٦ أيضاً مقاطع جانبية تبين كيف يكون للارتفاع التركيبي الواحد مقادير مختلفة من الانغلاقات التركيبية تبعاً لمعدل الميل الإقليمي.

ولكي تكون المصيدة فعالة لا بد أن يكون الانغلاق تماماً من الجوانب المختلفة كما لابد أن يعلو المصيدة صخر غير منفذ هو صخر الغطاء seal لمنع الموائع من التسرب (راجع شكل ٨-١).

ويعرف عمود الزيت oil column أو عمود الغاز gas column أو عمود الزيت والغاز oil and gas column بأنه المسافة الرأسية بين تماس الزيباء أو الغاماء إلى أعلى

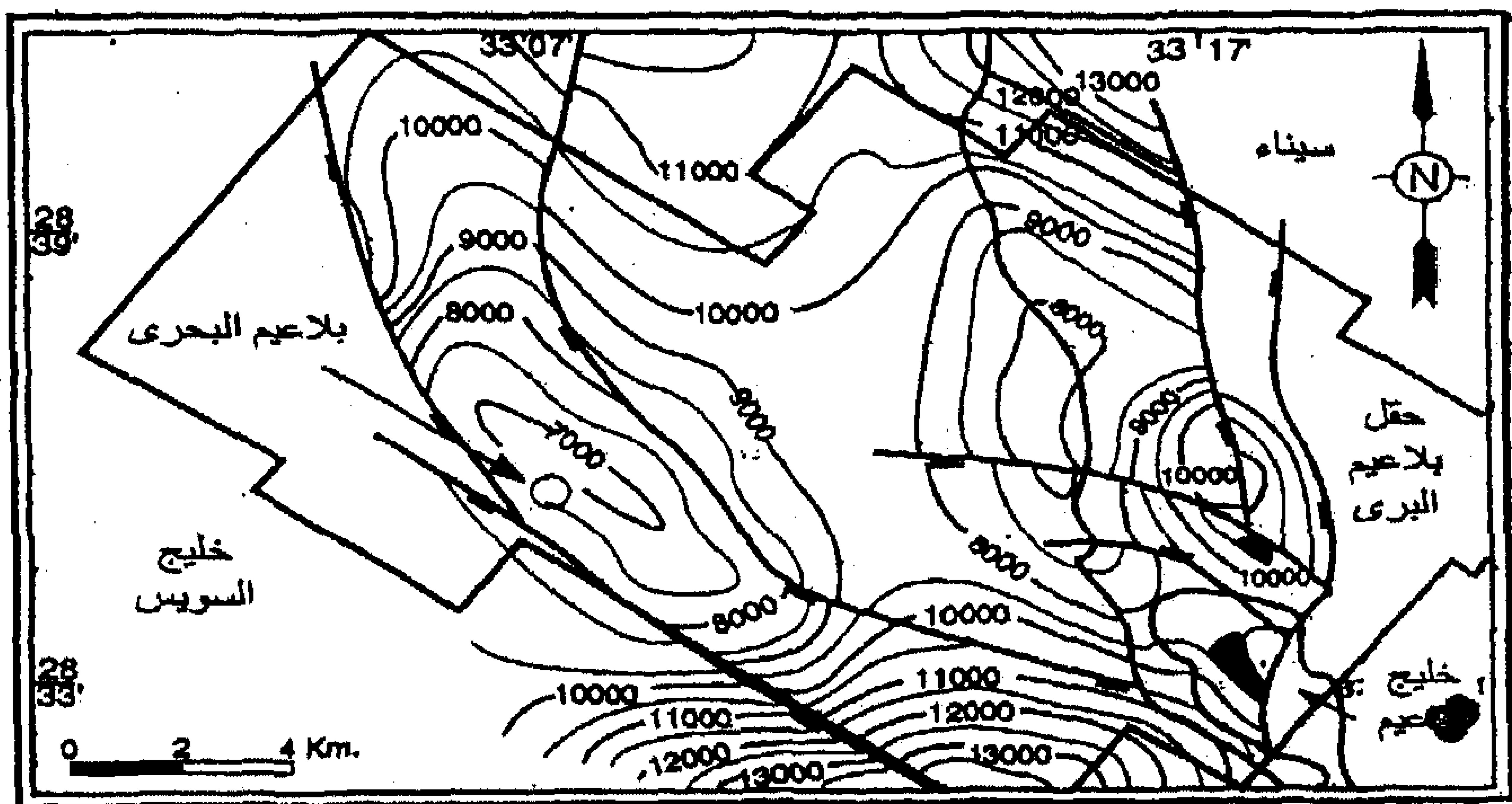
نقطة يمتد إليها الزيت أو الغاز في المصيدة، أو بمعنى آخر السمك الأقصى maximum thickness للزيت أو الغاز أو كليهما في الخزان الجوفي ويجب معرفته عند ذكر حجم البركة البترولية.

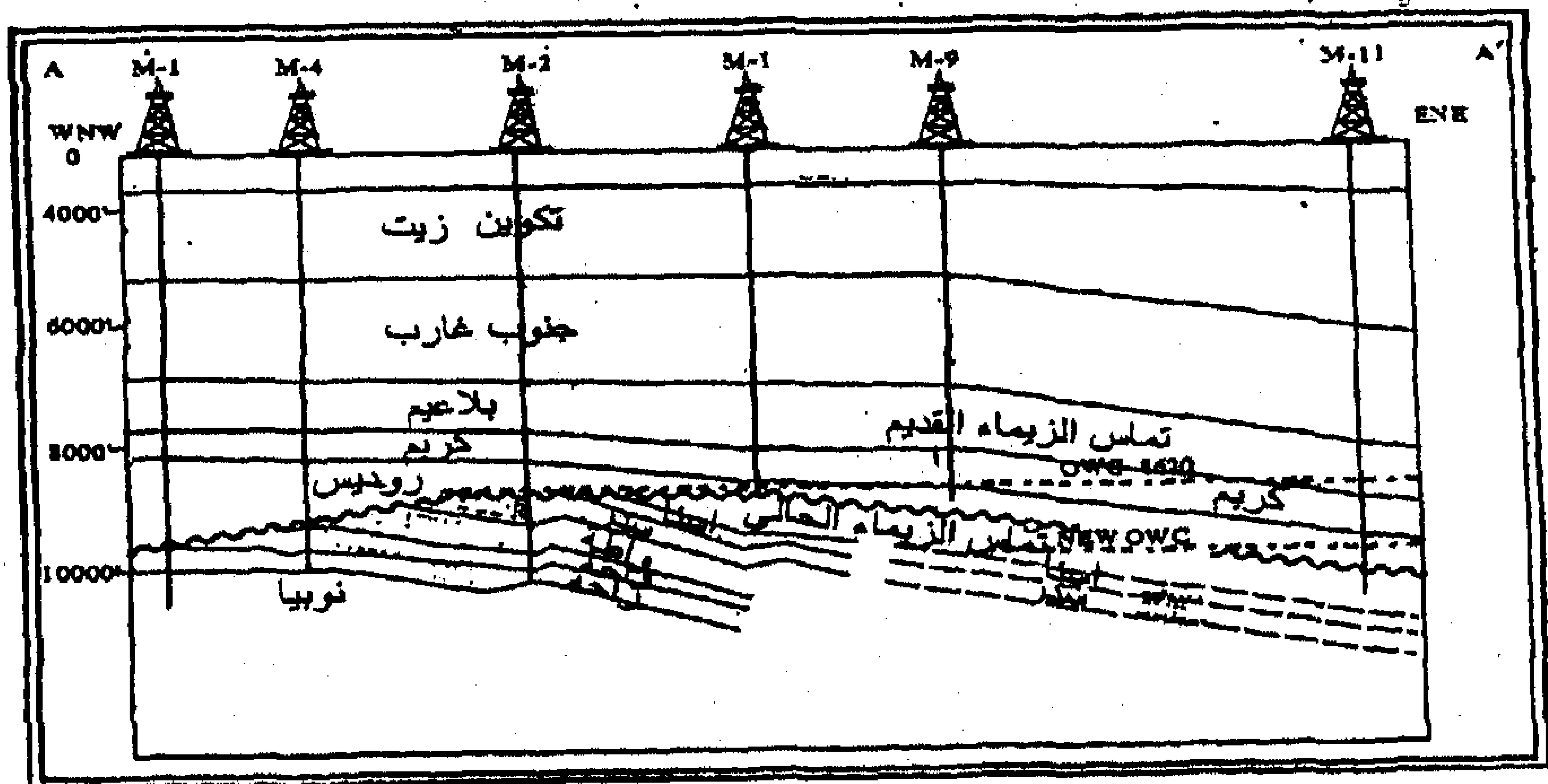
ومن الأمثلة الشهيرة لمصايد الطيات المحدبة حقل أبقيق Abqaiq oil field في السعودية ويتكون الخزان المنتج من الحجر الجيري البطروخي (الأوليتي) والدولوميتي من العصر الجوراسي (شكل ٨-٧)، ويمتد الحقل إلى أكثر من ٥٠ كيلو متراً كما يتسع إلى نحو ١٠ كيلومترات ويصل ارتفاع عمود الزيت به إلى أكثر من ٤٥٠ متراً، وكان معدل انتاج الحقل من آباره الـ ٦٦ الأولى نحو ١٧٠٠٠ برميل في اليوم للبئر الواحدة، وتمثل هذه المصيدة التي تتخذ شكل قبة مستطيلة elongate dome صورة لكثير من المصايد البترولية في الشرق الأوسط الغنية بالبترول والتي تعلو بعضها تكاوين معقدة منثنية وغير منتجة.



شكل ٨-٧: خريطة تركيبية على سطح الحجر الجيري الأوليتي بحقل أبقيق بالسعودية.

ومن مصايد القباب يمكن أن نسوق كمثال حقل بلاعيم البحري Belayim Marine بمنطقة خليج السويس في مصر حيث كشفت نتائج المسح السيزمي عن وجود تركيب قبوي بالمنطقة ويقطعه عند جانبيه صدعان رئيسان (شكل ٨-٨)، وبناء على ذلك حفرت البئر الأولى بالحقل BM-1 حتى عمق ٣١٠٠ متر، حيث عثر على البترول في طبقات الحجر الرملي (كريم ورودیس) من عصر الميوسين التي تعلو في وضع لا توافقي صخور ما قبل الميوسين Pre-Miocene، وفي هذه الأخيرة تم أيضاً العثور على البترول في طبقات الحجر الرملي من العصر الطباشيري وقدرت الاحتياطيات البترولية بنحو ١.٦ بليون برميل من الزيت الخام الذي تراوحت جودته بين ٢١ و٣١ درجة.

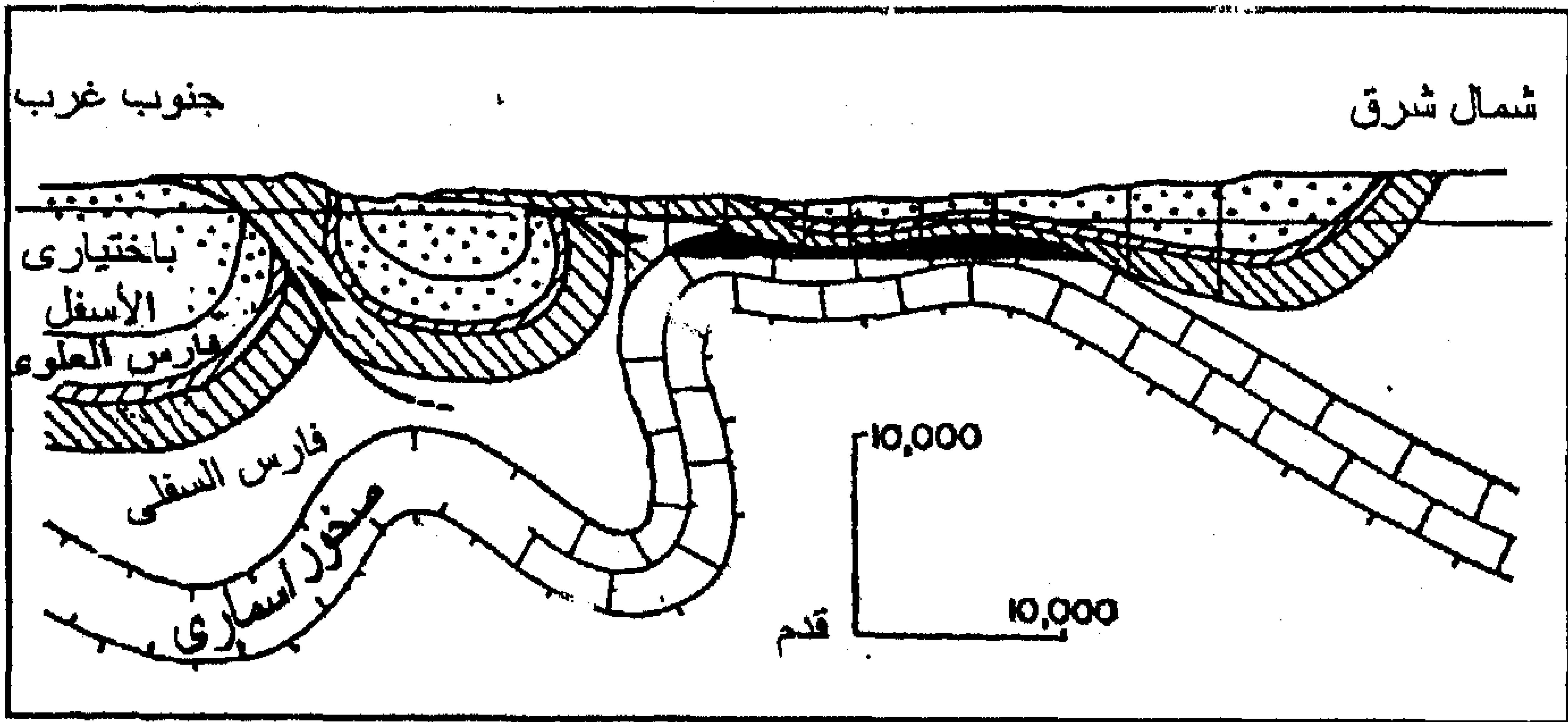




شكل ٨-٨: (أ) خريطة كنتورية تركيبية على سطح طبقة المارل (ميوسين) في حقل بلاعيم البحري.

(ب) قطاع جانبي بالحقل يبين التركيب الجيولوجي وسطوح اللاتوافق.

هذا ونشير إلى أنه في أحوال غير قليلة قد لوحظ اختلاف تثني الصخور السطحية عن تثني الطبقات التحتسطحية نظراً لتلدنية plasticity الطبقات السطحية وانسياب محتوياتها الملحية مما يعقد المسح الاستكشافي في تلك المناطق، ومن أمثلة ذلك حقل مسجد سليمان Masjid-i-Sulaiman بإيران والذي اكتشف في عام ١٩٠٨ ويعتبر من أكبر حقول البترول في العالم حيث حفرت البئر الأولى به في منطقة نضح سطحي فوق طية فارس السفلي Lower Fars وثبت فيما بعد أنها مستقلة تماماً على الطية الأساسية الموجودة تحت السطح على هيئة قبة (شكل ٨-٩)، وتنتج البترول من خزان الحجر الجيري الأسمري Asmari Limestone من عصر الميوسين والأوليجوسين، وقد تجاوز إنتاجه التراكمي من الزيت الخام البليون برميل.

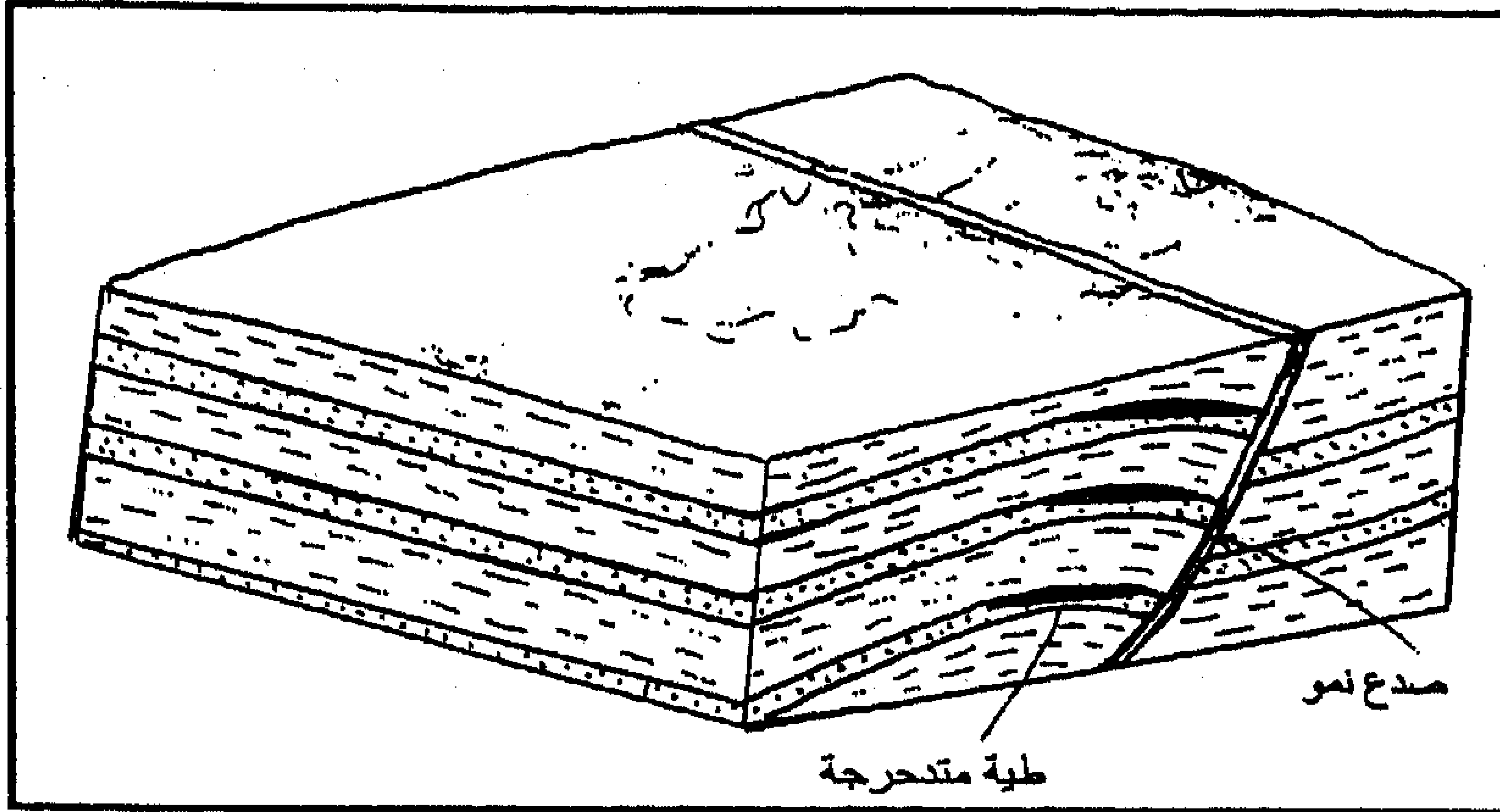


شكل ٨-٩: قطاع جانبي في حقل مسجد سليمان بإيران حيث يلاحظ التباين في التركيب بين طبقات فارس العلوي وصخور أسماري الجيرية.

صدوع النمو والطيات المتدحرجة:

ينشأ هذا النوع من المصايد البترولية في المناطق التي تزخر بكميات هائلة من الرسوبيات السائبة والتي يجري ترسيبها بشكل سريع في أحواضها كما يحدث في مناطق الدلتا والسهول الساحلية، وصدع النمو growth fault يتكون ويتحرك مع استمرار عملية الترسيب ويكون موازياً لخط الساحل، وبسبب ضخامة حجم الرواسب المندفعة إلى الحوض الترسيبي فإن هذا يعمل على جر الصدع مع الرواسب إلى داخل الحوض كما لو كان انزلاقاً أرضياً هائلاً

وتزداد رمية الصدع مع العمق (شكل ٨-١٠)، كما أن سمك الطبقات في الجدار السفلي أكبر منه في الجدار المعلق، وهو ما لا يحدث في حالة الأنواع الأخرى من الصدوع كالصدع العادي والمعكوس والتي تتعرض لها الصخور الرسوبية القديمة والتي ترجع أعمارها إلى ملايين السنين، وتتميز صدوع النمو بالخصائص الأربع الآتية:



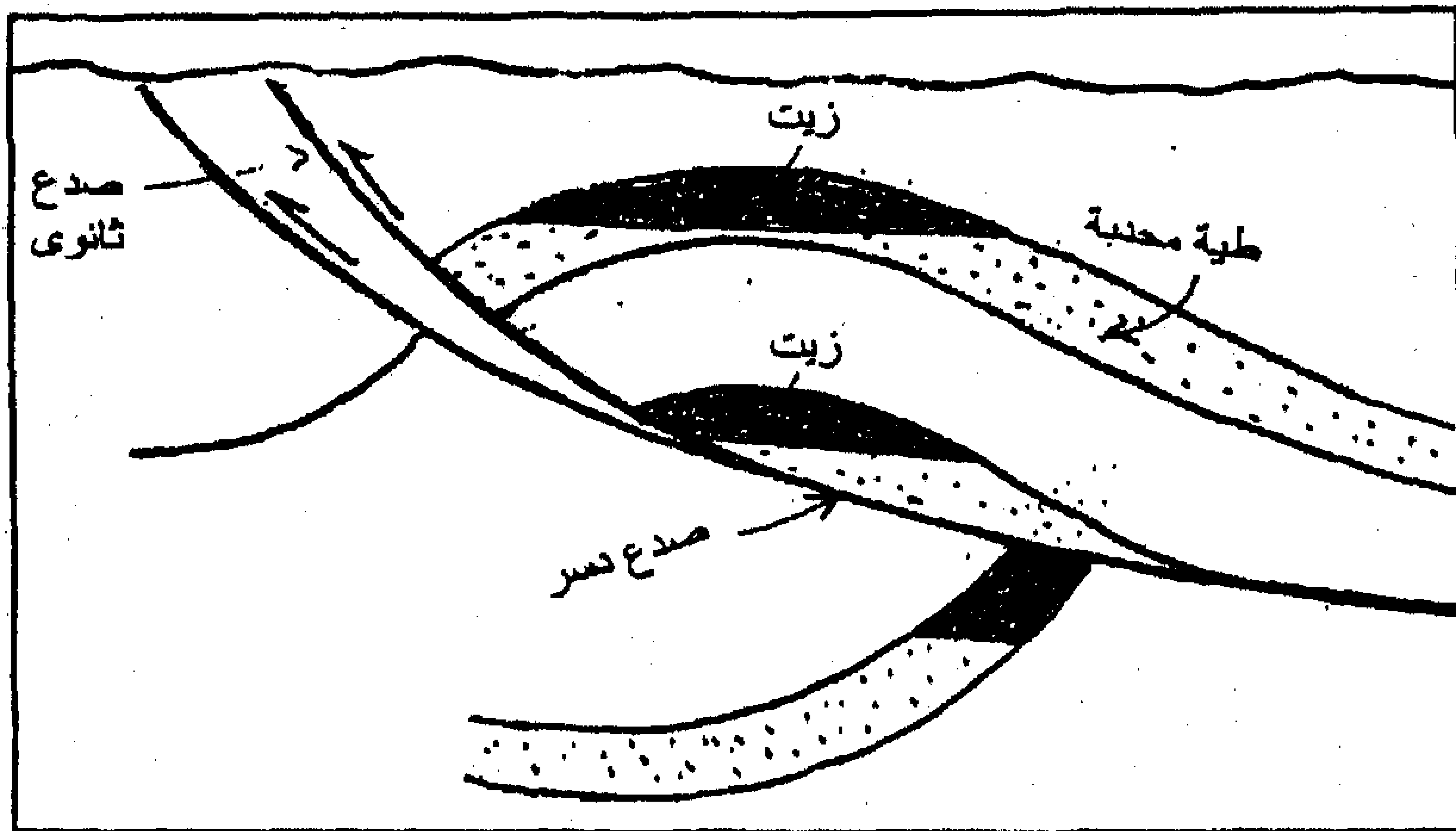
شكل ٨-١٠: صدع نمو مع طية متدحرجة.

- مستوى الصدع منحني ومقعر تجاه الحوض الترسيبي، وتقل شدة الانحناء مع ازدياد العمق وذلك على غير الحال في الصدوع الأخرى المعروفة كالصدع العادي والمعكوس ذات المستويات الصدعية المستوية، ويفسر ذلك بأن الحجم الهائل من الرواسب السائبة في صدوع النمو يكون كبيراً للغاية مما يعمل على انضغاط هذه الرواسب ويزيد من تقوس مستوى الصدع بالقرب من السطح وانبساطه كلما ازداد العمق.
- ازدياد سمك الطبقات في الجدار السفلي للصدع وذلك بسبب تحرك الرواسب تجاه الحوض الترسيبي وتجمع الرواسب بشكل أكبر كلما تعمقنا أكثر.
- تتعاظم إزاحة الصدع بازدياد سمك الرواسب والسبب في ذلك هو أن الرواسب الأعمق هي الأقدم في العمر وبالتالي فقد تعرضت بدرجة أكبر إلى تحرك الصدع خلال الفترة الزمنية.

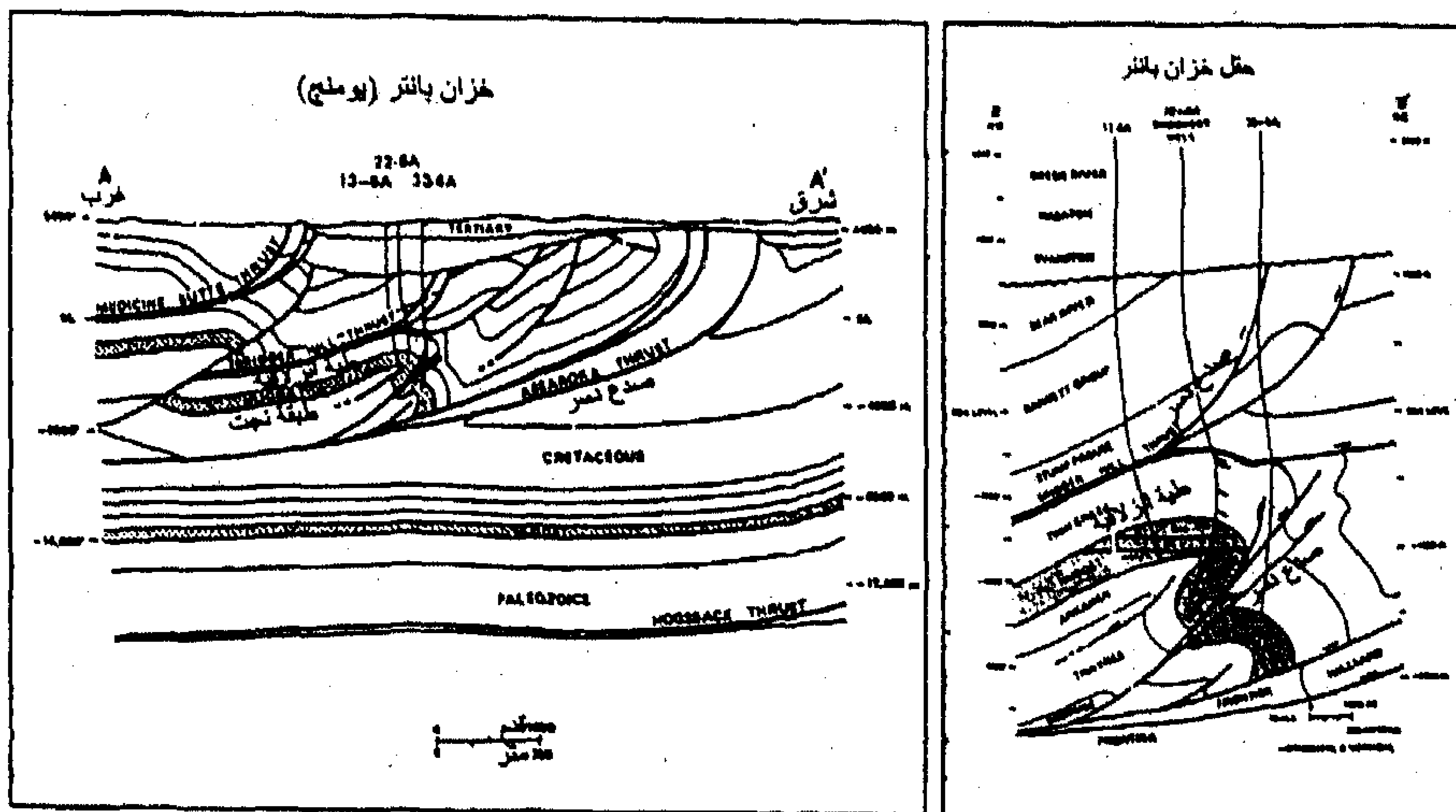
• بسبب انحناء مستوى صدع النمو واقترابه من الانبساط مع زيادة العمق وتحرك الصدع ينشأ عن ذلك ما يعرف بالطية المتدحرجة rollover anticline (شكل٨-١٠) حيث تتكون على جانبي الصدع فجوة gap بين الرواسب القريبة من السطح، مما يتيح للرواسب السائبة التدحرج إلى داخل هذه الفجوة مكونة هذا النوع من الطيات المحدبة، وهي طيات تعرف بإمكانيتها البترولية كما هو مشاهد في المناطق الساحلية بخليج المكسيك ودلتا نهرالنيجر، وفي هذه الدلتا هناك العديد من الطيات المتدحرجة والتي غالباً ما تقطعها صدوع صغيرة تعرف بالصدوع الثانوية secondary faults كثيراً ما تكون عازلة وتقسم الحقل إلى وحدات خزانية منفصلة، ويوجد في هذه الدلتا ما يقرب من ١٠٠حقل تم العثور عليها ويقدر حجم الاحتياطي القابل للإنتاج من كل حقل منها بنحو ٥٠ مليون برميل، كما يقدر هذا الاحتياطي في ١٢ حقلاً منها بأكثر من ٥٠٠ مليون برميل من الزيت الخام.

الطيات الانزلاقية:

تنشأ الطيات الإنزلاقية drag folds من الاحتكاك الحادث على سطح الصدع وتحرك هذا الأخير بسبب القوى الضاغطة حيث يؤدي ذلك إلى انزلاق الطبقات إلى أعلى على أحد جانبي الصدع وإلى أسفل على الجانب الآخر منه، مما قد ينتج عن هذا أن تعلو الطبقات القديمة الطبقات الأحدث منها وتكون الصدوع المعكوسة الدسرة thrust faults والتي قد تتجاوز قدرتها الاندفاعية عشرات الكيلومترات (شكل ٨-١١).



شكل ٨-١١: رسم تخطيطي يوضح وجود طية محدبة مع صدع دسر.



شكل ٨-١٢: الطية الانزلاقية وصدوع الدسر (الاندفاعية) بحقل خزان بانتر بالولايات المتحدة.

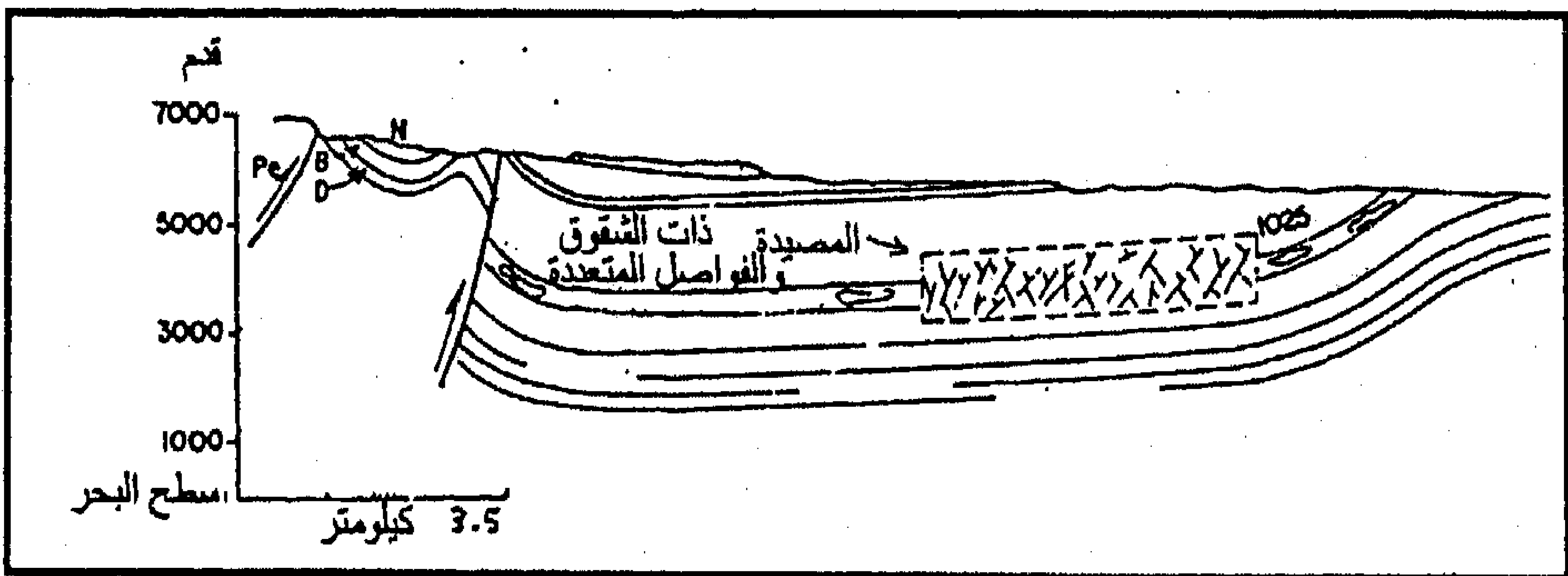
ومن الأمثلة النموذجية للطيات الانزلاقية والصدوع الاندفاعية الدسرة نسوق حقل خزان بانتر Painter Reservoir field بولاية وايومنج Wyoming بالولايات المتحدة والذي تم اكتشافه عام ١٩٧٧ وينتج الزيت والغاز من طبقة الحجر الرملي Sandstone Nugget والتي توجد على عمق حوالي ٣٠٠٠ متر من السطح ويزيد سمكها الفعال على ٢٣٥ متراً (شكل ٨-١٢) ويرجع العمر الجيولوجي لها إلى العصر الجوراسي.

والجدير بالذكر أن تحديد مواقع الطيات الانزلاقية لايمكن التنبؤ به من المكاشف السطحية بسبب ذلك التشوه الشديد الذي اعتراها إلى أن أمكن للباحثين في سبعينيات القرن الماضي إدخال تحسينات جوهرية في أسلوب العمل السيزمي والمساحة الحقلية وتجهيز ومعالجة البيانات الواردة حتى أصبح الأمر حافزاً على العمل في تلك المناطق ذات المخاطر العالية من حيث الأداء والتكلفة.

مصايد التشقق:

يكون تشقق fracturing الصخور الخزانية القصيفة والسريعة الكسر سبباً شائعاً لإحداث المسامية والنفاذية، وتعتبر في بعض الأحوال السبب الرئيس لتكون المصيدة البترولية، ففي حقل فلورنس Florence field بولاية كولورادو بالولايات المتحدة يختزن

الزيت داخل الجزء المتشقق من الطفل الكريتاوي المستوى الوضع ذي النسيج الموحد فوق منطقة واسعة، والتشقق وحده هو المسئول عن وضع المصيدة إذ لا يوجد تثن أو تغير طبقي يصاحب البركة ولا يوجد تجمع بترولي حيث ينتهي التشقق (شكل ٨-١٣)، وكان الإنتاج من هذه البركة على غير ما كان متوقعاً حيث حققت إحدى الآبار المحفورة بالحقل أكثر من مليون ونصف برميل من الزيت. كذلك فقد وجد الغاز الطبيعي في طبقة الطفل من العصر الكربوني في ولاية كانكاس، حيث ينتشر هذا الغاز بشكل منتظم وموحد في هذا الصخر، ويتم الإنتاج على فترة زمنية طويلة ودون تدن كبير في ضغط الخزان. ومن الأمثلة الحقلية أيضاً إنتاج الزيت الخام من صخر الطباشير والمعروف عادة أنه غير صالح كصخر خزان نظراً لقلة نفاذيته للموائع، ومع ذلك نجد أن طباشير أوستن Austin Chalk من الكريتاوي الأعلى في حقل ماونت كالم Mount Calm field بولاية تكساس يحتوي على الزيت الخام داخل المصيدة البترولية التي نشأت عن تكسير وتشقق الطباشير. وبالإضافة إلى الصخور الرسوبية المتشققة فقد عثر على البترول في عدد من الصخور القاعية (نارية ومتحولة)، ففي كاليفورنيا على سبيل المثال أمكن إنتاج ما يقرب من ١٦ ألف برميل/ يوم من الزيت من خزانات تنتسب إلى صخور القاع النارية المجواة والمتشققة، وكذلك من صخور الشيست schist المتحولة بمنطقة لوس أنجلوس، كما أن هناك عدداً من حقول البترول في مصر يأتي إنتاجها من خزانات الصخور القاعية المجواة والمتشققة مثل حقول شعب على وجنوب جيسوم والغردقة بمنطقة خليج السويس.



شكل ٨-١٣: قطاع جانبي في حقل فلورنس بكولورادو يبين مصيدة بترولية في طبقة طفل (بيير) من العصر الكريتاوي ذات التشققات والفواصل المتعددة.

(٢) المصايد الطبقية:

وهي المصايد التي تسبب في تكوينها عامل طبقي stratigraphic أو ليثولوجي lithologic أو كلاهما معاً، فقد يحدث مثلاً تغير في مسامية أو نفاذية الصخر الخزان أو تضاؤل وتدفق في سمكه أو توقف في امتداده الجانبي أو تغير في سحنته الليثولوجية من حجر رملي مثلاً إلى طفل أو حجر جيري مسامي إلى حجر جيري غير مسامي وهكذا.

وتقسم المصايد الطبقية stratigraphic trapsإلى نوعين رئيسين هما: المصايد الطبقية الأولية وهي تلك المصايد التي تكونت أثناء ترسيب أو تكون الصخر كالعدسات أو الشعاب أو غيرها، والمصايد الطبقية الثانوية وهي التي نشأت في مرحلة لاحقة لترسيب الصخر الخزان كعمليات الإذابة والسمنتة واللاتوافق.

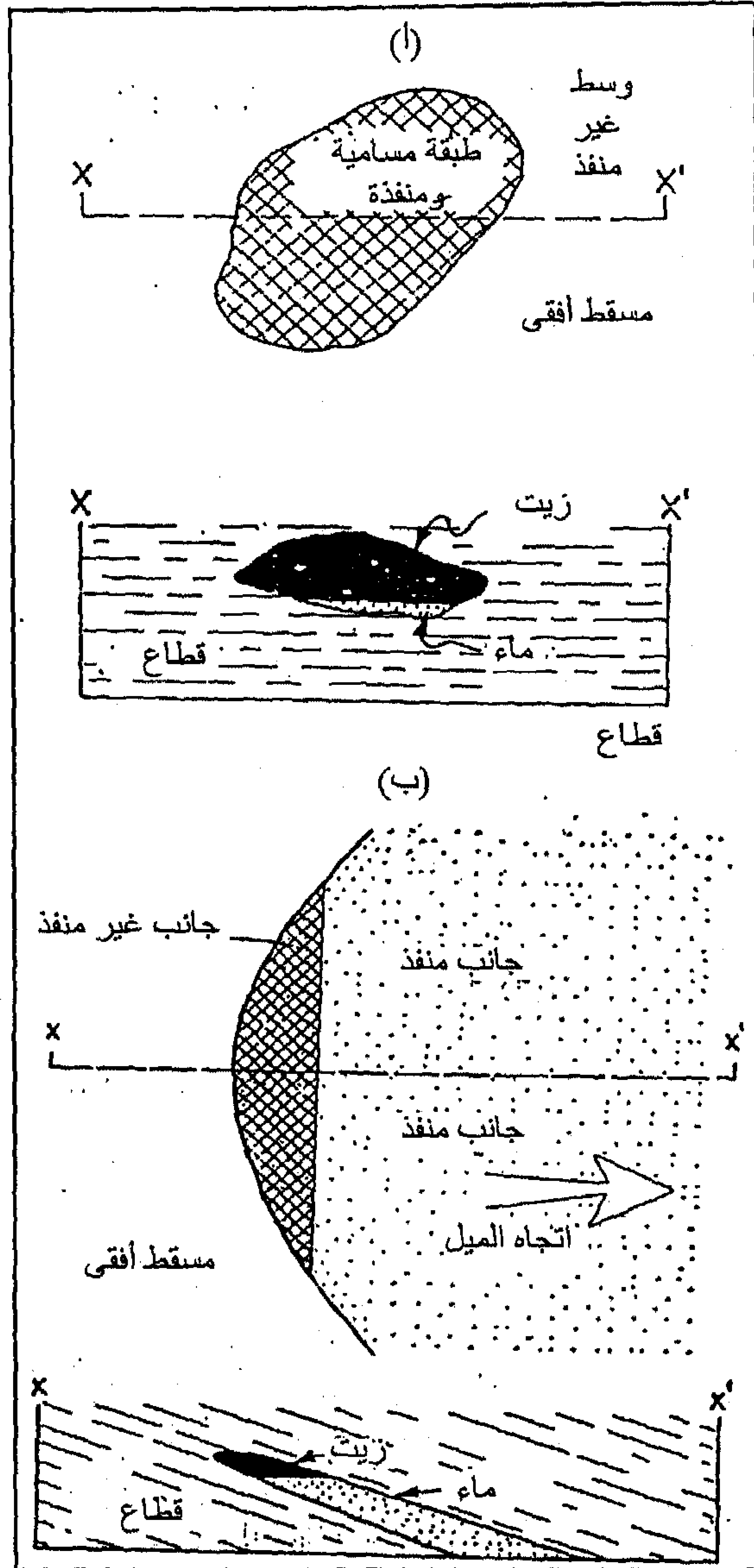
المصايد الطبقية الأولية:

وهي مصايد ناتجة عن نوع البيئة الترسيبية والتي ترتبط بالمادة التي يتكون منها الصخر الخزان والظروف التي ترسبت تحتها، ويشمل هذا النوع من المصايد البترولية ما يلي:

(أ) المصايد الطبقية الأولية في الصخور الفتاتية:

يوجد بعض هذه المصايد على هيئة أجسام عدسية الشكل لصخور مسامية ومنفذة تحيط بها صخور غير منفذة كالطفل (شكل ٨-١٤ أ)، وهذه الأجسام عادة ما تكون محدودة الامتداد لبعض كيلومترات وتتكون عادة من مادة فتاتية clastic كالحجر الرملي أو الأركوز أو بعض أنواع الصخور النارية والمتحولة المجواة weatheredوالمعاد ترسيبها وهي محدودة في امتدادها وتكون إما حادة الأطراف أو متدرجة، كذلك فإن التغير السحني لصخر ما أو مجموعة من الصخور قد يتسبب في تكون المصيدة البترولية، وإذا كان هذا التغير بسبب الخصائص الصخرية مثلاً من صخر منفذ إلى غير منفذ سمي بالتغير الليثولوجي lithofacies change (شكل ٨-١٤ ب)، أما إذا كان هذا التغير بسبب تغير في المحتوى الحفري ووجود بقايا للكائنات العضوية به من عدمه فيطلق عليه التغير الحيوي biofacies change، وقد يحتل البترول العدسة الصخرية كاملة أو الجزء المسامي منها، ومن المشاهد أن هذه المصايد ربما يتكرر وجودها على المستوى الإقليمي وبالتالي فإن العثور عليها محلياً قد يدفع الباحثين إلى التحرك إقليمياً للكشف عن المزيد من تلك المصايد. ومن أمثلة هذا النوع من المصايد ما يعرف بمصيدة رباط الحذاء الرملي

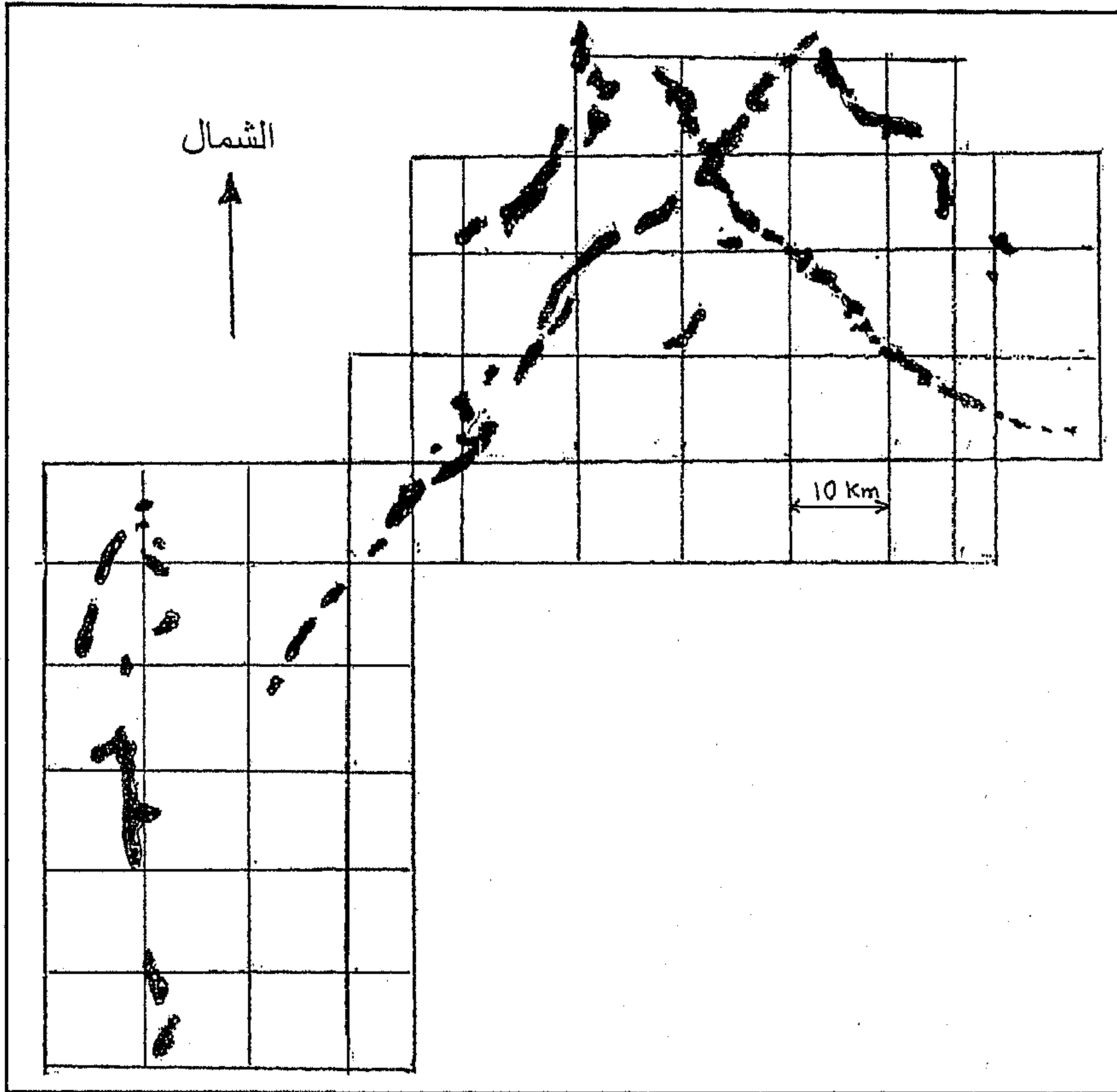
وتتكون هذه المصيدة كما يتبين من اسمها من رواسب رملية shoestring sand trap ضيقة يمكن اعتبارها كعدسات رملية من نوع خاص، ويبلغ عرض المصيدة نحو كيلومتر ويصل طولها إلى عدة كيلومترات.



شكل ٨-١٤: (أ) رسم تخطيطي لمصيدة عدسية محاطة بصخور غير منفذة.

(ب) رسم تخطيطي لمصيدة طبقية محاطة تماماً بصخور غير منفذة وحيث تتغير سحن الصخر الخزان وتتضاءل نفاذيته في اتجاه أعلى الميل.

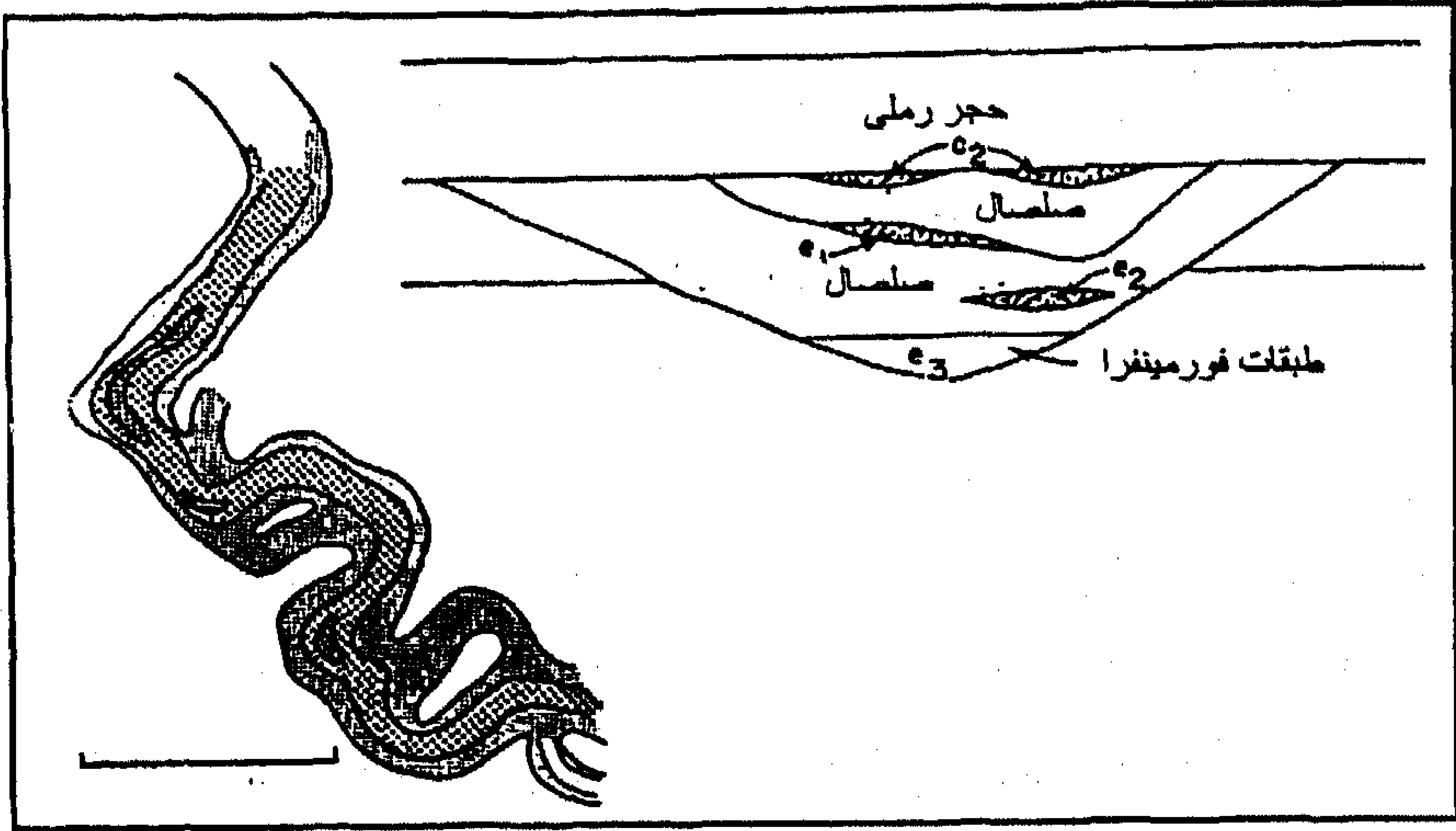
ويحيط بهذا النوع من المصايد الطين والصلصال إحاطة كاملة إلا عند نهايتها، ويعتقد بعض الجيولوجيين أنها قد تنشأ من امتلاء المجاري المائية بالرمال أو هي حواجز رملية شاطئية النشأة، وتعتبر رمال جرينوود وبتلر Greenwood and Butler بكانساس الأمريكية أمثلة جيدة لمصائد رباط الحذاء الرملية وقد أنتجت هذه المصايد بترولاً عالى الجودة امتدت هذه المصايد إلى أكثر من ١٧٠ كيلو متراً و٨٠ كيلو متراً عرضاً حيث تكون الرمال عدسات طولية يتراوح سمكها بين ١٥ و ٨٠ متراً واتساعها حوالي ٢،٥ كيلو متر يتبع بعضها البعض (شكل ٨-١٥).



شكل ٨-١٥: خريطة توضح امتدادات مصايد رباط الحذاء الرملية في كانساس الأمريكية.

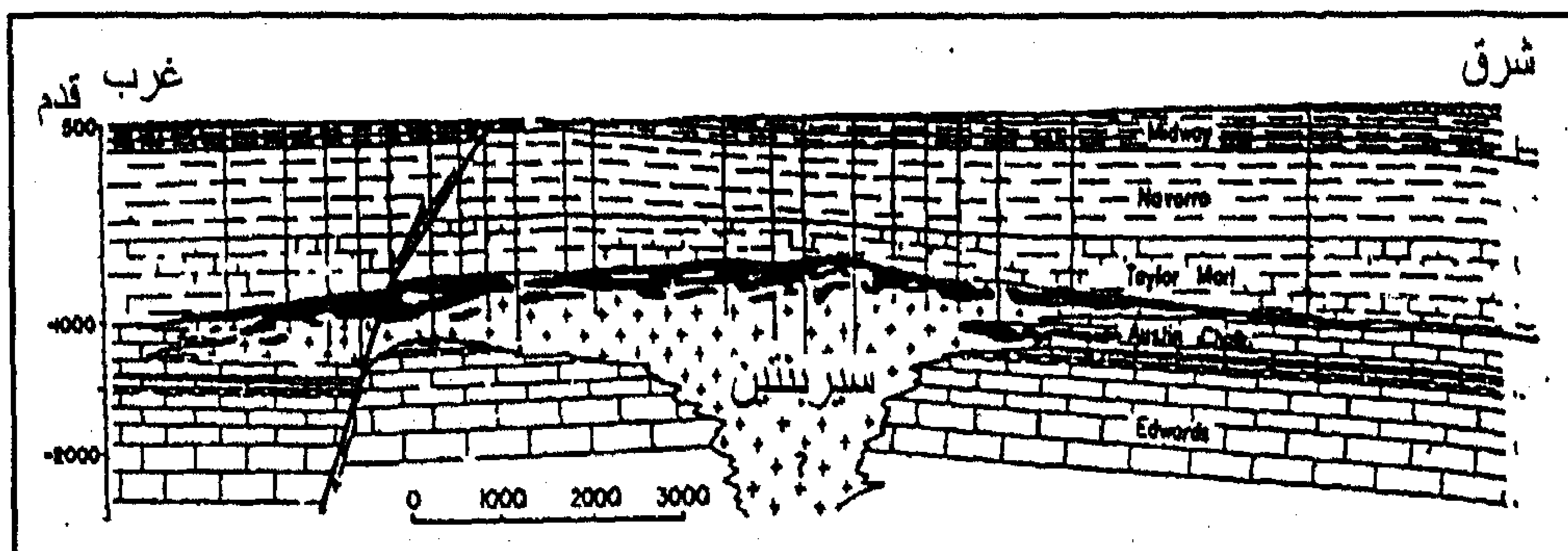
ومن الأمثلة أيضاً حقل مايكوب Maikop field بروسيا والذي تتكون فيه المصيدة البترولية من عدد من الرواسب الرملية في مجاري الأنهار ويأتي الإنتاج من الحجر الرملي المتعدد الطبقات والذي يعود إلى حقبة الثلاثي ويمتد إلى أكثر من ثماني كيلو مترات، وقد

أنتجت البئر الاستكشافية الأولى من طبقة الحجر الرملي العليا ما يربو على ٣٧٥ ألف برميل من الزيت في وقت قصير ومن عمق ٨٥ متراً فقط، كما كان معدل الإنتاج اليومي للبئر الواحدة ٧ آلاف برميل، ووصل الإنتاج المجمع من إحدى الآبار ما يزيد على ٢،٥ مليون برميل خلال الستة أعوام الأولى من إنتاج الحقل (شكل ٨-١٦).



شكل ٨-١٦: خريطة وقطاع يوضحان المصايد البترولية في الرواسب الرملية في مجاري الأنهار القديمة بحقل مايكوب في روسيا.

وإضافة إلى مصايد رباط الحذاء هناك أيضاً عدسات الصخور البركانية lenses of volcanic rocks وتتكون المصيدة المنتجة في هذه الحالة من كتل عدسية الشكل لصخور نارية محاطة بمجموعة من الصخور الرسوبية، ولقد تدخلت على سبيل المثال صخور نارية بازلتية في أزمنة جيولوجية مختلفة داخل تكاوين من العصر الكريتاوي الأعلى من منطقة السهل الساحلي الداخلي في تكساس حيث توجد هناك ١٧ كتلة نارية مكونة مصائد بترولية ذات احتياطيات اقتصادية، وتتكون هذه الكتل النارية جزئياً من صخور قاعدية غير متغيرة، ولكن البترول يوجد في الصخور النارية المتغيرة والتي يطلق عليها الحفارون هناك السيربنتين serpentine داخل وحول المخروطات البركانية الأصل وقد يتراوح إنتاج الآبار من الزيت الخام ما بين عدة براميل إلى أكثر من ٥٠٠٠ برميل في اليوم، كما تراوحت جودة الزيت من المنخفضة إلى العالية ما بين (٣٦-٣٩ درجة)، والشكل ٨-١٧ يوضح قطاعاً جانبياً في حقل ليتون Lytton Springs بتكساس.



شكل ٨-١٧: قطاع خلال حقل ليتون اسبرنجز بتكساس حيث الخزان المنتج من الصخور النارية المتغيرة (سيربنتين).

وتجدر الإشارة إلى أن اكتشاف هذا النوع من المصايد البترولية أمر صعب للغاية ذلك أن موقع هذه المصايد نادراً ما يمكن التعرف عليه من الطيات أو التشوهات التي تحدث للطبقات التي تعلو تلك المصايد. ولكي تنجح عمليات الاستكشاف بهذه المناطق يتطلب الأمر حفر العديد من الآبار الاختبارية حتى يمكن الوصول إلى صورة أوضح لاتجاهات وسمات هذه المصايد، ويتوقف نجاح المهمة على الحرفية التي ترسم بها الخرائط لهذا النوع من المصايد والبيانات الواردة من الآبار التي تم حفرها بالمنطقة، وإذا ما تأكد العثور على مصيدة من هذا النوع يزداد الأمل في العثور على مصيدة أخرى في ذات المنطقة أو في منطقة مجاورة، والصدفة تلعب دوراً كبيراً في هذا الشأن فقد يكون الهدف الأصلي هو العثور على مصيدة تركيبية كطية محدبة أو صدع.

(ب) المصايد الطبقية الأولية في الصخور الكيميائية:

يوجد قسمان من المصايد الطبقية في الصخور ذات الأصل الكيميائي وهما على النحو التالي:

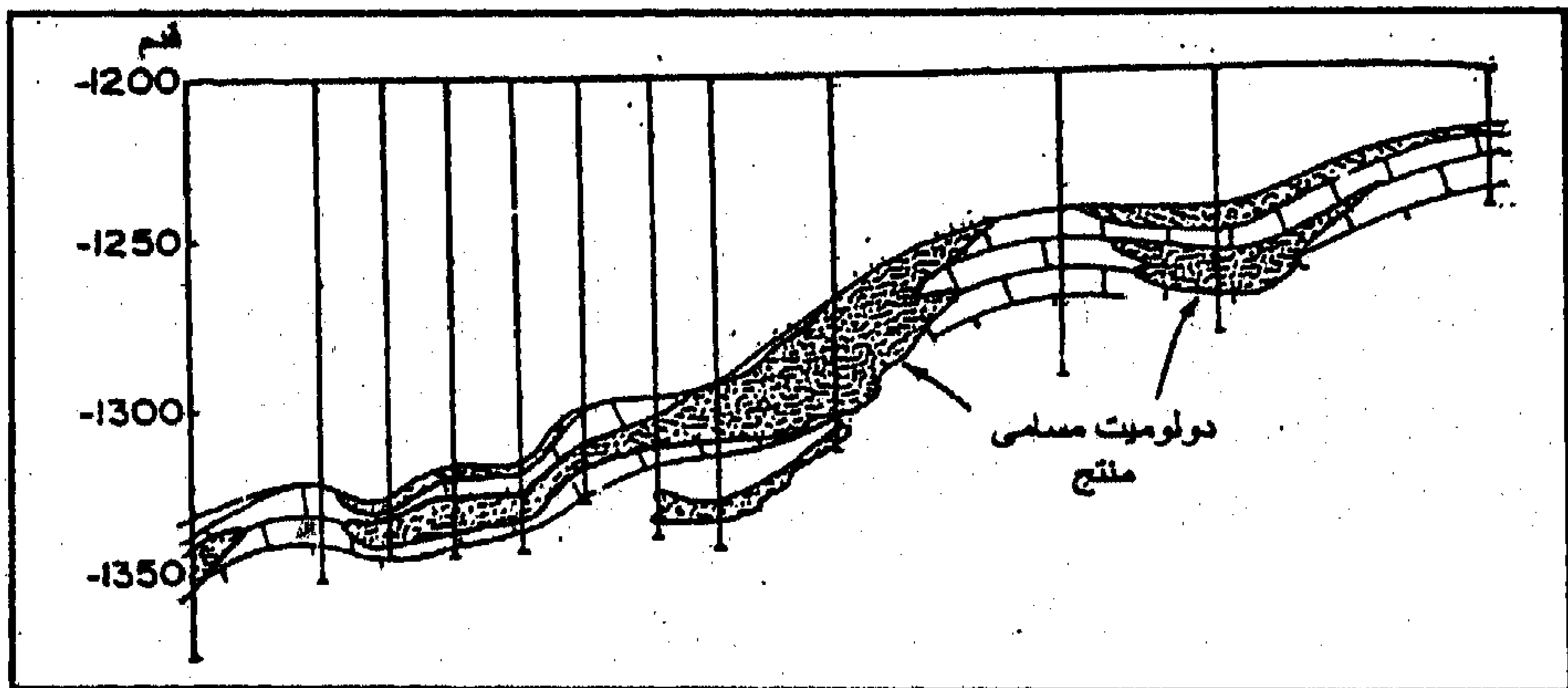
- سحن صخرية lithofacies أو حيوية biofacies تحيط بها أو تنتهي إلى طفل أو حجر جيري أو دولوميت غير منفذ، وعدسات مسطحة تقريباً تتكون من الرواسب الجيرية للكائنات وتسمى بيوستروم biostromes.
- كتل جيرية عدسية أو ربوية الشكل تتكون أساساً من فتات الكائنات المترسبة تحيط بها صخور غير منفذة وتسمى بيوهيرم bioherms.

السحن الكربوناتية المسامية:

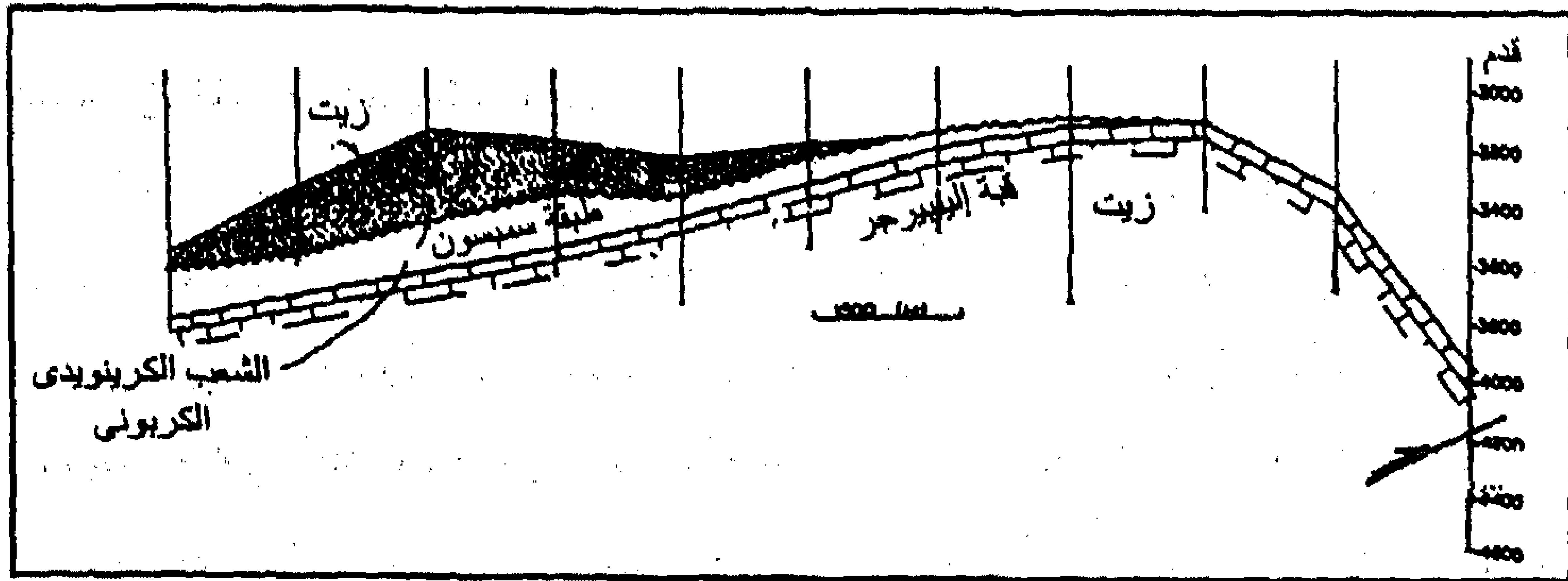
تشبه المصايد المكونة بهذه الطريقة مصايد السحن الرملية إلا أن الصخر فيها مصدره كيميائي ويتكون عادة من الكربونات، وأكثر الأنواع شيوعاً يتكون من الحجر الجيري الدولوميتي أو الدولوميت حيث يصبح الصخر أكثر مسامية وذلك بعد إحلال المغنيسيوم محل الكالسيوم جزئياً بواسطة عمليات الدلمتة dolomitisation.

وتوجد بعض مصايد هذا النوع في سحن رملية أو تشيرتية منفذة يحيط بها صخر كربوناتي، كما أن بعضها يوجد في عدسات فتاتية موادها معادة التبلور تتكون أساساً من الأووليت oolite أو أصداف أو كسارة كربوناتية وتسمى البقايا العضوية المرتبة في طبقات كهذه بيوستروم.

ومن أمثلة المصايد البترولية التي تكونت من دلمتة الحجر الجيري حقل بلشر Belcher field في انتاريو بكندا حيث يبين القطاع الجيولوجي وجود أجزاء من الدولوميت المسامي يحيط بها حجر جيري غير منفذ وترجع إلى العصر السيلوري كما في شكل ٨-١٨. ومن أمثلة المصايد البيوسترومية حقل تود Todd field في تكساس (شكل ٨-١٩) حيث يظهر الشعب الكرينويدي الزنبقي من العصر الكربوني الذي يرتكز على الجانب الغربي من طية إلينبيرجر Ellenburger fold وتحتوي كل الشعب الزنبقية وطية إلينبيرجر على برك بترولية، ويلاحظ أن ترقق وتضيق طبقة سمبسون Simpson تجاه القبة يرجع إلى احتمال وجود جزيرة من الحجر الجيري في السابق ناحية الشرق كانت السبب في نمو الكائنات الشعبية وتجمعها في هذا المكان.



شكل ٨-١٨: قطاع في حقل بلشر البترولي باونتاريو في كندا يبين المصايد المتكونة من الدولوميت المسامي يحيط بها حجر جيري غير منفذ.

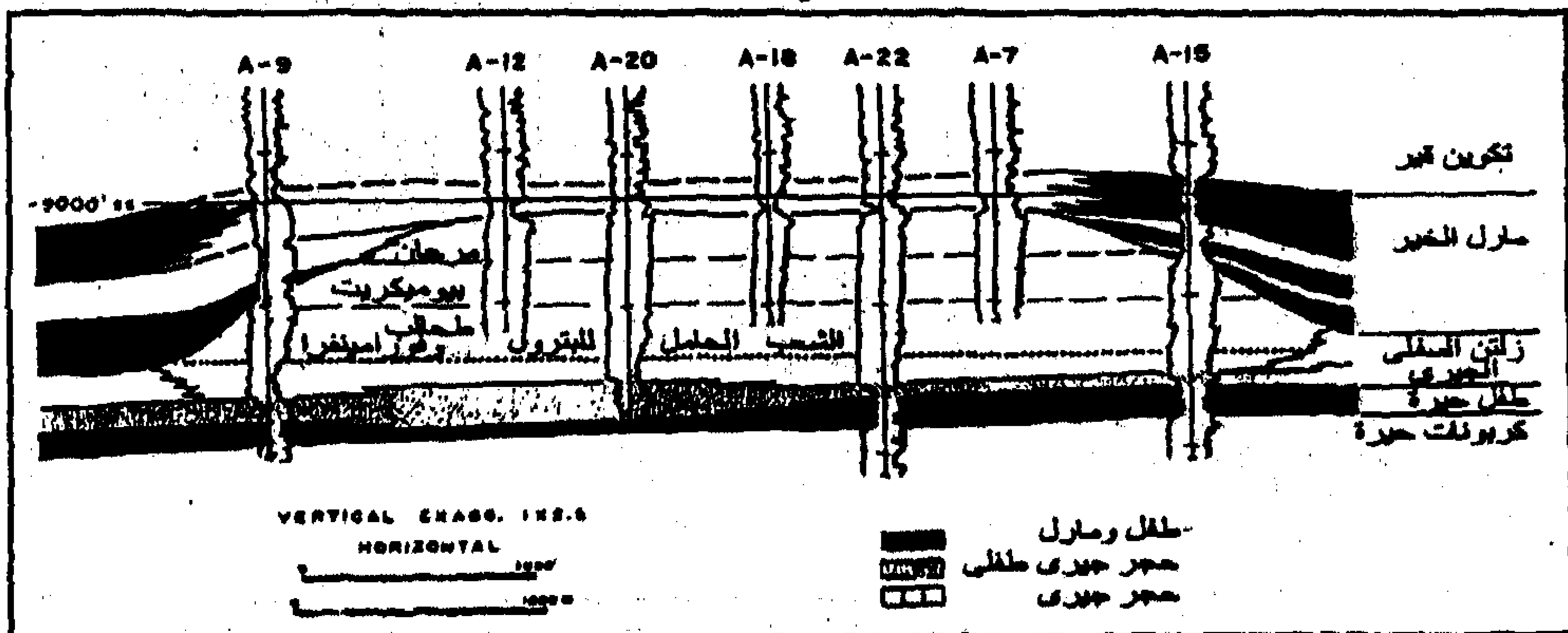


شكل ٨-١٩: قطاع عبر حقل تود في تكساس يوضح الشعب الكرينويدي من العصر الكربوني الذي يرتكز على الجانب الغربي من طية إلينبيرجر.

الشعب العضوية:

توجد كثير من البرك البترولية الكبيرة في العالم وخاصة في أمريكا الشمالية مختزنة في مصايد من الشعب العضوية organic reefs ذات الأشكال والأحجام والأعمار الجيولوجية المختلفة من ما قبل الكمبري حتى الحديث.

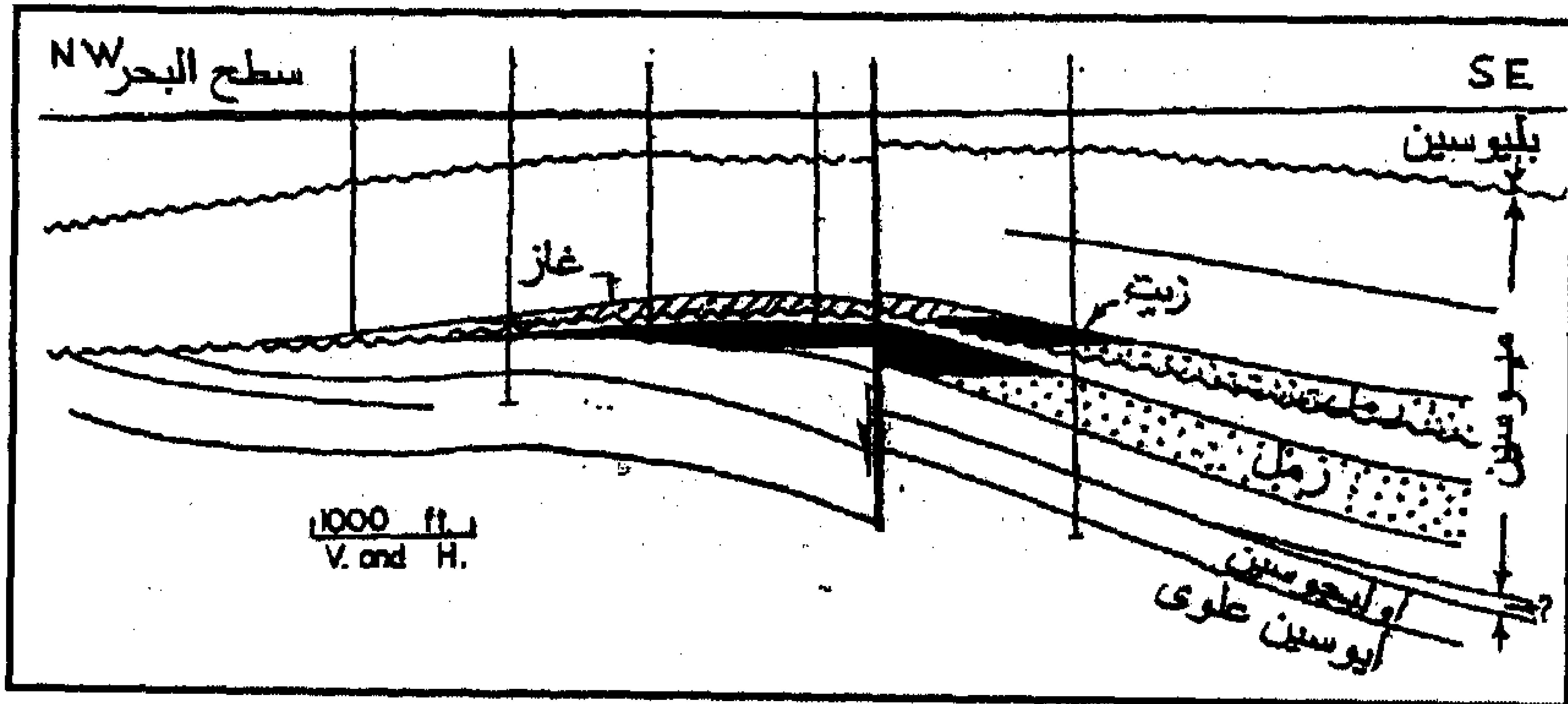
ويطلق اسم بيوهيرم على الأجسام العضوية المستديرة القبابية الشكل المبنية كلية أو أساساً من كائنات مثل المراجين أو الطحالب والرخويات وغيرها تحيط بها صخور غير منفذة ذات خصائص صخرية مغايرة، ويميز هذا الاصطلاح الشعب الدائرية عن الشعب الكبيرة المستطيلة التي يبلغ طولها عشرات أو مئات الكيلومترات ولا تتعدى بضعة كيلومترات في الاتساع كما تناولنا ذلك من قبل، ولعل ما نشاهده في حقل انتصار بليبيا خير مثال على ذلك (شكل ٨-٢٠) حيث يتكون البيوهيرم من المرجانيات والطحالب والفورامينفرا وغيرها وتحيط بها صخور غير منفذة ويختزن البترول في تلك الشعب وباحتياطيات ضخمة.



شكل ٨-٢٠: قطاع جيولوجي في حقل انتصار A بحوض سرت في ليبيا يوضح الشعب الكربوناتي الحامل للبترول من الباليوسين العلوي.

المصايد الطبقية الثانوية:

تنشأ هذه المصايد عن تغير أو مخالفة طبقية ظهرت بعد ترسب الصخر وما تأثر به من العمليات الجيولوجية اللاحقة وما يرتبط ذلك في أغلب الحالات من ظاهرة اللاتوافق، ومن ثم كان من المناسب تسمية هذه المصايد بمصايد اللاتوافق unconformity traps، وتوجد الصخور الخازنة للبترول فوق أو تحت مستوى اللاتوافق مباشرة أو في داخل المواد المجواة weathered materials التي تعين اللاتوافق نفسه، ويبدو بذلك أن اللاتوافق من الظواهر المهمة في جيولوجيا البترول كما أشرنا إلى ذلك في الفصل الرابع إذ إن كثيراً من البرك البترولية - أن لم يكن معظمها - ذا صلة وثيقة باللاتوافق بكيفية ما أو بأخرى، وقد يعين سطح اللاتوافق الحد الفاصل بين تكوين منفذ وآخر غير منفذ ويصبح بذلك الحد العلوي أو السفلي للخزان البترولي، ويبين الشكل ٨-٢١ قطاعاً تركيبياً في حقل تلال أنتيلوب هيلز Antelope Hills field بكاليفورنيا حيث توجد بركتان بتروليتان إحداهما فوق سطح اللاتوافق والأخرى تحت هذا السطح.



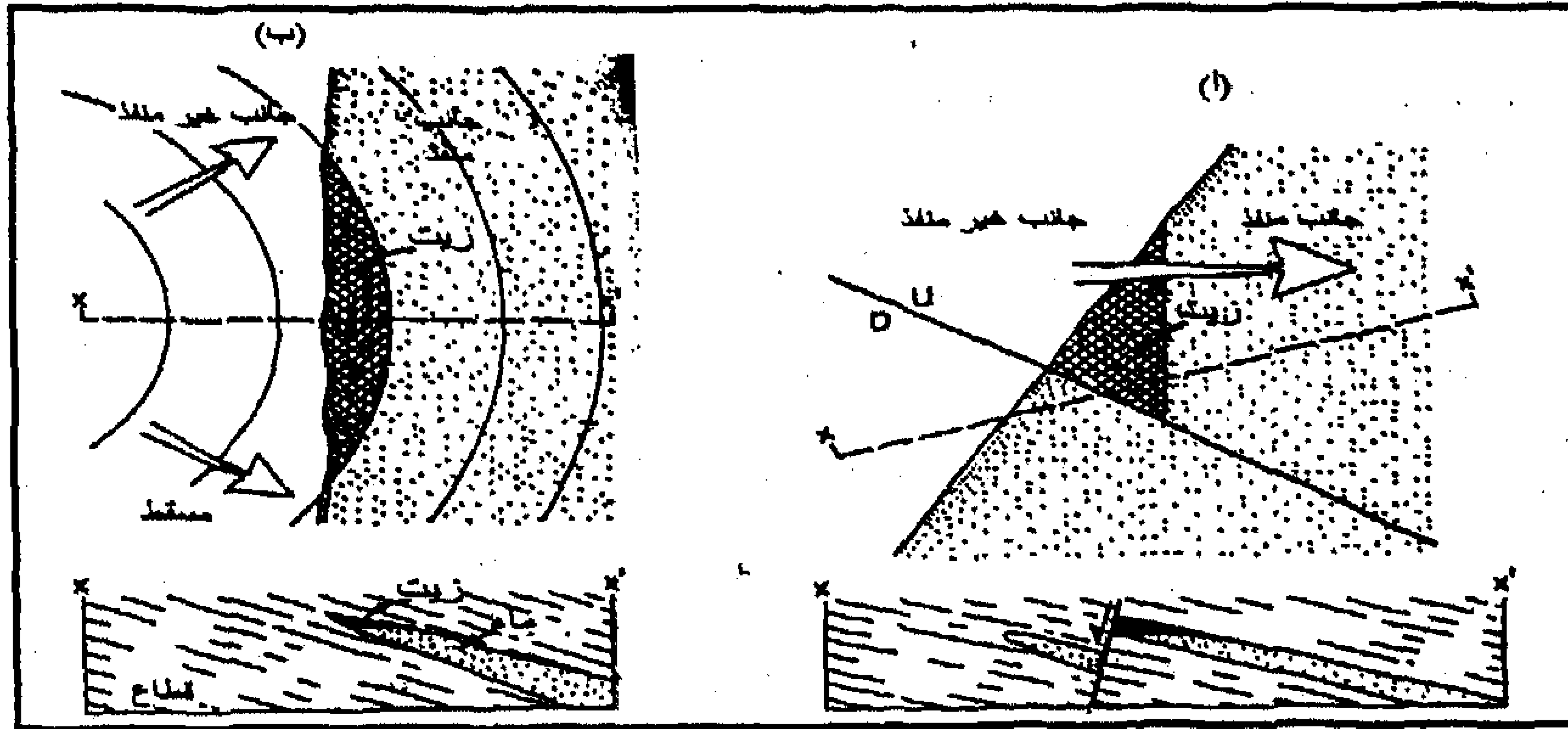
شكل ٨-٢١: قطاع تركيبي في حقل أنتيلوب بكاليفورنيا حيث توجد بركتان للبترول إحداهما فوق سطح اللاتوافق والأخرى تحت هذا السطح.

(٣) المصايد المشتركة:

المصايد المشتركة أو المختلطة combination traps هي نوع من المصايد الذي ينشأ عن عناصر طبقية وتركيبية بنسب متقاربة ولهما تاريخ مشترك، فقد يكون العنصر الطبقي ناتج عن نفاذية حافة صخر الخزان ويكون العنصر التركيبي بسبب التثني أو التصدع للصخر أو كليهما، وتتكون المصيدة بذلك من العنصرين الطبقي والتركيبي إذ لا يمكن أن تتكون بواحد منهما وإلا أصبحت غير مختلطة. وقد يكون العنصر الطبقي مبكراً أثناء

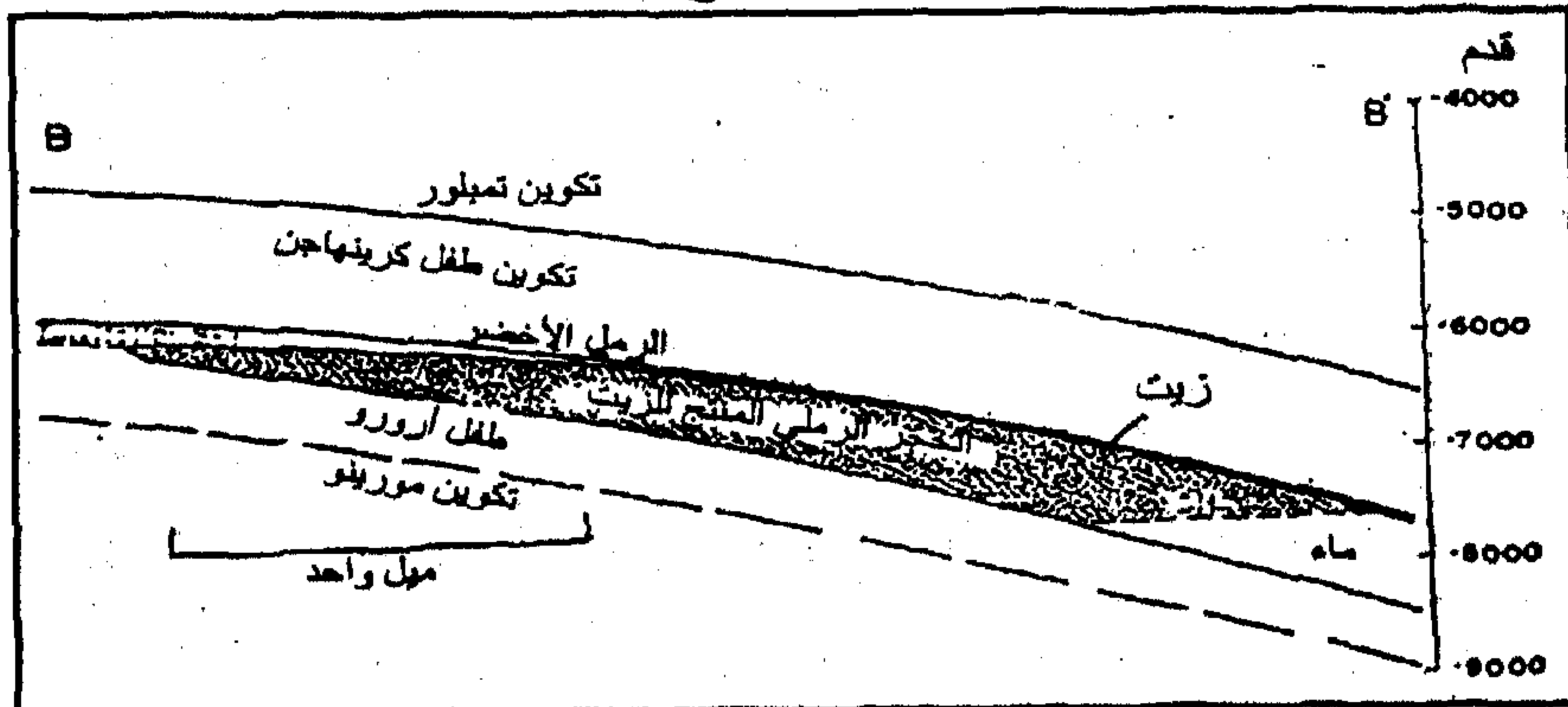
الترسيب أو بين تكوين الصخر والخزان، وقد يكون متأخراً بسبب العمليات اللاحقة كالسمنتة cementation واللاتوافق، وقد يكون العنصر التركيبي قبل أو بعد العنصر الطبقي مباشرةً أو بعده بفترة طويلة، المهم أن يظهر تأثير العنصرين على تكوين هذه المصيدة، بغض النظر عن التوقيت لأي من هذين العنصرين.

ويمثل الشكل ٨-٢٢ رسماً تخطيطياً لمصيدة مشتركة يبين الجانب الأيمن تقاطع صدع مع حافة نفاذية، ويبين الجانب الأيسر تثنياً مع حافة نفاذية.



شكل ٨-٢٢: رسم تخطيطي لمصيدة مشتركة (أ) تقاطع صدع مع حافة نفاذية.
(ب) تثن مع حافة نفاذية.

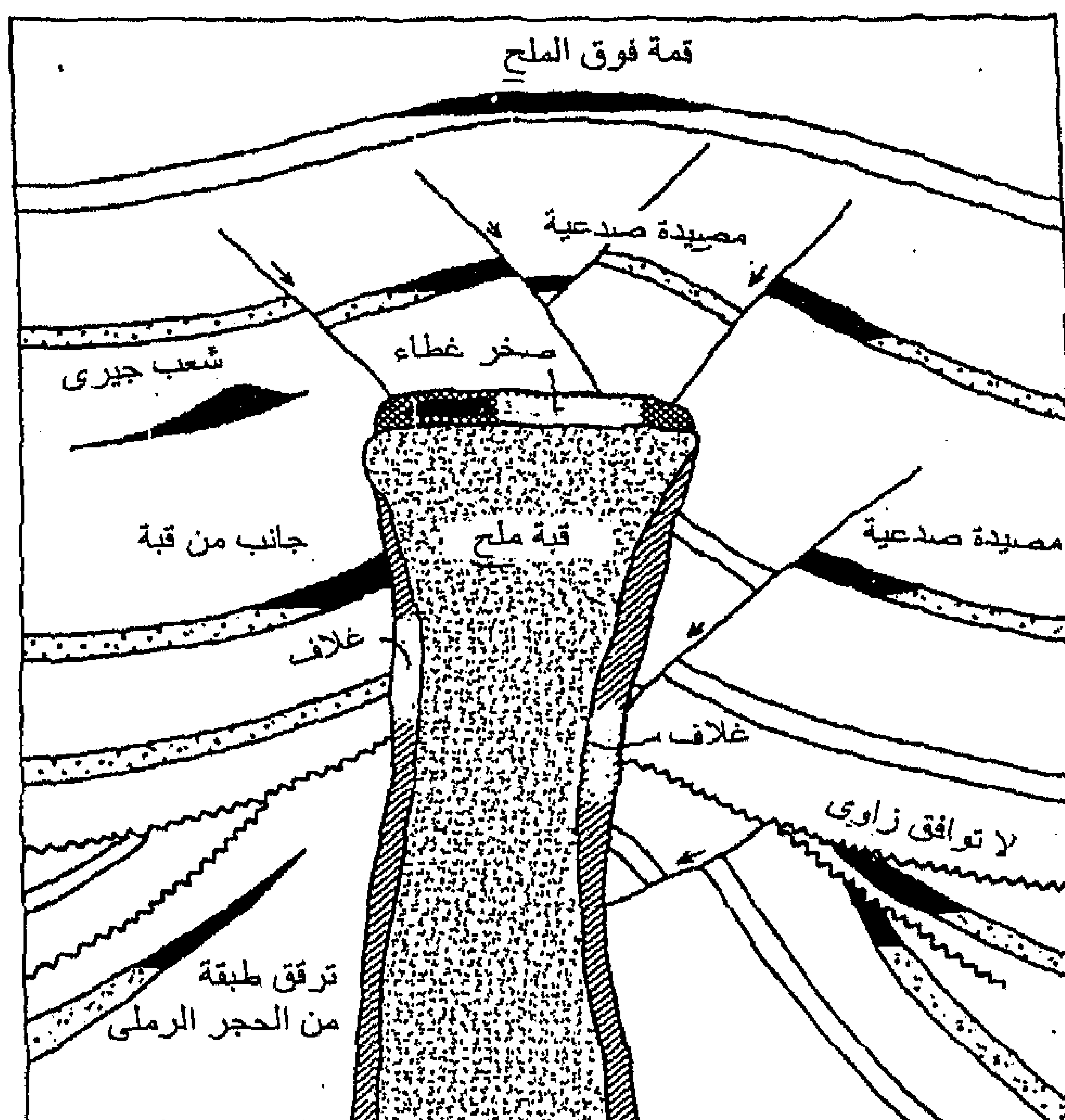
أما الشكل ٨-٢٣ فيمثل قطاعاً جيولوجياً عبر حقل كولنجاCoalinga field بكاليفورنيا ويظهر مصيدة مشتركة لحافة نفاذية مع تثن.



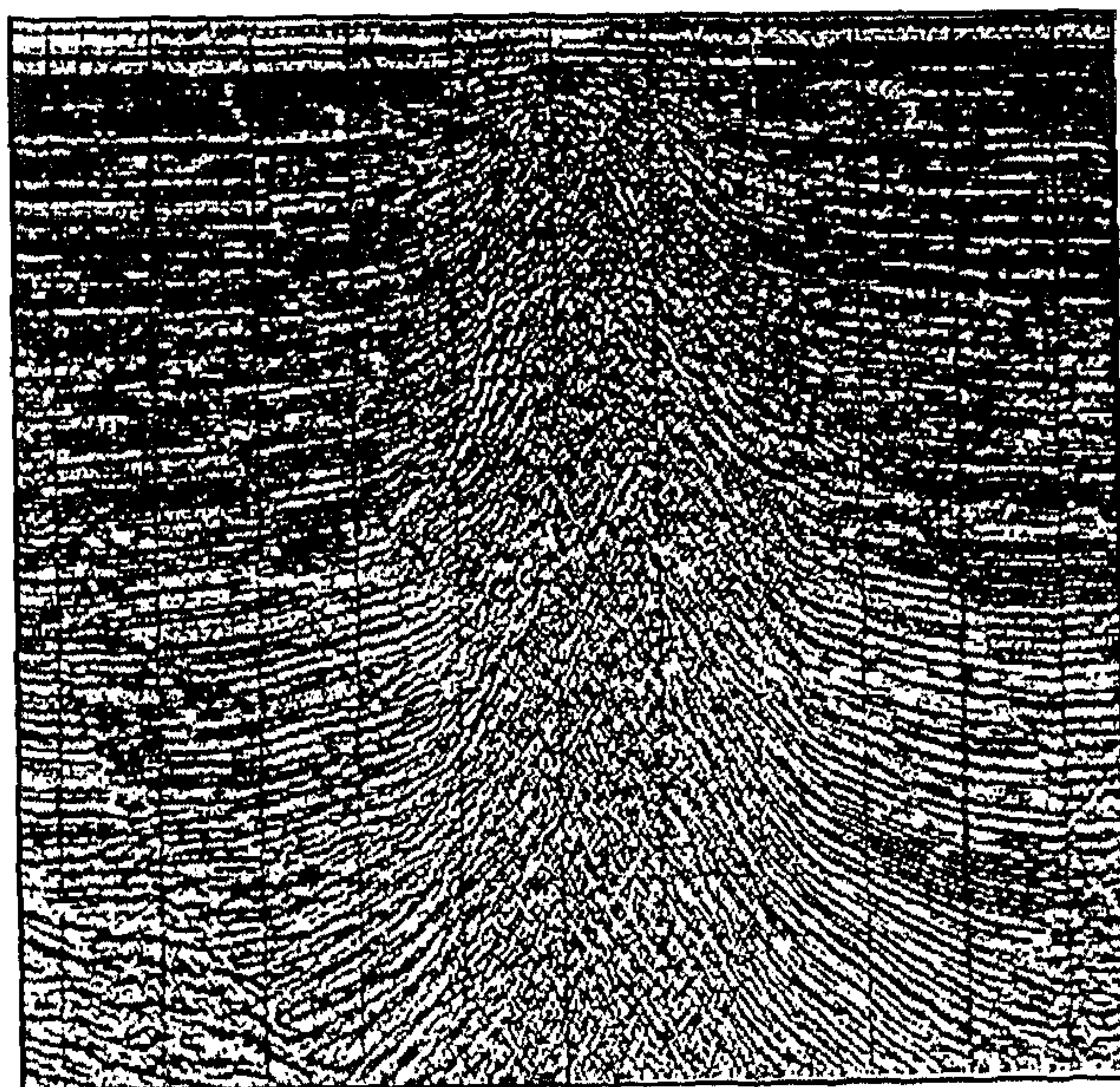
شكل ٨-٢٣: قطاع عبر حقل كولينجا بكاليفورنيا
يظهر مصيدة مشتركة لحافة نفاذية مع تثن.

ومن أهم أنواع المصايد المشتركة تلك المصاحبة للقباب الملحية salt domes حيث تؤدي تدخلات intrusion الملح الصخري في الرواسب التي تعلوها إلى تكوين مجموعة متنوعة من المصايد التركيبية والطبقية والمشتركة، كما يصحب بعض هذه المصايد تدخل للصخور النارية، غير أن كثيراً من المصايد التي تكونت بفعل تدخل الملح أو الصخور النارية كانت غير منتجة، وقد يعزى عدم إنتاج مثل هذه المصايد المصاحبة للتدخل الناري إلى درجات الحرارة العالية التي تعرضت لها الصخور الرسوبية لأن التدخل حدث بعد ترسب الرواسب بفترة طويلة تحرك خلالها أي بترول يحتمل وجوده إلى مصايد أخرى أو إلى عدم وجود البترول أصلاً في الأماكن التي حدث فيها التدخل، وتوجد قباب الملح في عدد من المناطق بالعالم شمال بحر قزوين بروسيا وشرق يوتا وتكساس وكولورادو بالولايات المتحدة، وتعرف القباب الملحية كذلك في جنوب إيران حيث مسحت أكثر من ١٠٠ حشوة ملحية salt plug كانت كلها غير منتجة، كما تعرف قباب ملحية غير منتجة في مناطق بالبحر الأحمر وشمال أفريقيا وجنوب شرق فرنسا وغيرها. وتتأثر طبقية وتركيبية الرواسب المجاورة للحشوة الملحية عندما تصعد هذه الحشوة اللدنة مخترقة تكاوين الخزان مكونة حواف الطبقات المنثنية لأعلى عند ضغطها بإحكام مقابل الملح مصايد عديدة على جوانب الحشوة، ويصحب الحركة العلوية للحشوة الملحية تشقق كبير مع تصدع قطري وطرفي radial and rim faulting يقطع صخور الخزان الجانبية إلى كتل مثلثية كثيرة تكون بعضها مصايد تحتوي على البترول كما هو موضح بالشكل ٨-٢٤ والذي يمثل قطاعاً تخيلياً في قبة ملحية تظهر فيه أنواع البرك البترولية الموجودة في المصايد المصاحبة للتدخل الملحي، ويبين الشكل ٨-٢٥ قطاعاً سيزمياً تظهر فيه قبة الملح وتحيط بها الطبقات الرسوبية التي تثنت إلى أعلى بفعل تدخل الملح مكونة عدداً من المصايد.

وتجدر الإشارة إلى أن قباب الملح يكسو سطحها العلوي صخر الغطاء والذي يتكون عادة من الأنهيدريت والجبس والحجر الجيري الدولوميتي وأحياناً الكبريت، ويعتبر الأنهيدريت هو الغطاء الغالب ويعلو قمة الحشوة الملحية مباشرةً وعادةً ما يصل سمك صخر الغطاء ما بين ٩٠-١٠٠ متر وربما بلغ نحو ٣٠٠ متر.



شكل ٨-٢٤: قطاع تخيلي لقبة ملحية تظهر حولها وأعلاها عدد من البرك البترولية المحتملة.



شكل ٨-٢٥: قطاع سيزمي يوضح بجلاء وجود قبة ملح وتأثيرها على الصخور الرسوبية والتراكيب الجيولوجية والمصايد البترولية.

المصايد الخاوية:

في عدد ليس بالقليل من المناطق كان العثور على هذه المصايد الخاوية barren traps والتي لا تحتوي على البترول هو أمر يحدث أثناء عمليات البحث والإستكشاف بالرغم من وجود انغلاق تركيبي بالمصيدة واحتوائها على صخر يتمتع بمسامية ونفاذية تؤهله لاختزان البترول، وتفسير هذا الأمر يمكن أن يعود إلى عدد من الأسباب نذكر منها ما يلي:

- خلو المنطقة من الصخور المصدرية ربما لعدم توافر البيئة الترسيبية الملائمة أو تلف المادة العضوية قبل تحولها إلى بترول.
- عدم تولد البترول من الأصل حيث إننا لا نعلم على وجه التحديد كيفية تحول المادة العضوية إلى بترول، وما هي العوامل التي ساعدت في عملية التحول ونوعية المواد الحفازة والوقت اللازم للتحول البترولي.
- عدم استطاعة الزيت الوصول إلى المصيدة، فوجود طية كبيرة على ممر الانسياب يمكن أن يمنع الزيت من الوصول إلى طية أصغر عند موقع أعلى بالنسبة للطية الكبيرة حتى يكتمل ملء هذه الأخيرة بالبترول ويتوجه الفائض منه إلى الطية الصغيرة عبر نقطة التصريف.
- هروب الهيدروكربون إلى مكان جديد بسبب وجود ميل إقليمي يدفع على تصريف البترول إلى خارج المصيدة، كذلك فإن الشقوق والصدوع قد تعمل على هروب الزيت إلى أعلى السطح حيث يتبدد الهيدروكربون هناك، وعلى سبيل المثال يرجح أن إعادة تثني طية كركوك بالعراق قد تسبب في تكسير للصخور اللاحمة ودفع الزيت للهروب من الطية، ومن الأسباب أيضاً أنه لا يوجد صخر غير منفذ بشكل مطلق مما قد يسمح بتسرب وتطاير الهيدروكربون خلال المسام الصخرية الدقيقة وعلى مدى الأزمنة الجيولوجية الطويلة دون الحاجة إلى إحداث تشقق أو تكسير.
- دمار وهلاك البترول وذلك عن طريق عمليات التحول الشديدة وقلقلة القشرة الأرضية وتجوية الصخور أو عن طريق تأثير البكتيريا المستهلكة للهيدروكربون.
- تكون المصيدة في فترة لاحقة لما لتوقيت تجمع البترول من أهمية بالغة في هذا الشأن حيث ستصبح المصيدة غير ذات أهمية إذا ما جاءت نشأتها في وقت متأخر عن

زمن هجرة البترول وتجمعه، ولا يمنع أن يكون سمك الصخور الخزانية في الطيات الخاوية أكبر كثيراً من مثيله في المصايد المنتجة.

- انعدام الانغلاق التركيبي لما لهذا العنصر من أهمية للغاية في نشأة المصيدة وبالتالي فإن عدم توفر هذا الانغلاق بالتراكيب الجيولوجية خلال تاريخها الجيوتكتوني لن يتيح الفرصة لاحتجاز البترول واصطياده داخل الصخر الخزان.

الفصل التاسع

نشأة البترول والصخور المصدرية

لا يزال الجدل قائماً حول كيفية نشأة البترول وتجمعه داخل الصخور الخزانية petroleum generation and accumulation، ولقد احتار الجيولوجيون والباحثون منذ سنوات عديدة في تفسير هذه الكيفية وبرزت التساؤلات حول ماهية هذه المادة وهل البترول من أصل عضوي أم غير ذلك؟ ثم كيف تحولت هذه المادة إلى بترول؟ وهل كانت نشأة البترول في مكانه الحالي أم أنه رحل إلى هناك حيث مستقره الحالي؟ وانطلاقاً من هذه التساؤلات كان من الضروري أن نخصص أكثر من فصل لتغطية هذه الموضوعات المثيرة بدءاً من نشأة البترول والصخور المصدرية إلى هجرة وتجمع البترول ليتواصل الحديث إلى الطبيعة الكيميائية للبترول كمكون هيدروكربوني.

ولا شك أن للرأي أو النظرية التي يعتقد في صحتها الباحث تأثيراً على الطريقة التي سوف يتبعها عندما يخرج إلى الحقل بحثاً عن البترول مما سوف يساعد كثيراً على تقليص عامل المخاطرة وبالتالي ترشيد نفقات الاستكشاف، ومن خلال ما جاء من آراء وبناء على مصدر المادة الأصلية المكونة للبترول يمكن حصر تلك الآراء في نظرتين أساسيتين: النظرية غير العضوية والنظرية العضوية لنشأة البترول.

نظريات نشأة البترول:

النشأة غير العضوية:

تفسر هذه الافتراضات التي كانت سائدة في القرن التاسع عشر نشأة البترول على أنها نتيجة تفاعلات كيميائية على نطاق واسع في باطن الأرض، ويؤيد ذلك أنه أمكن تحضير مواد هيدروكربونية مثل الإيثان والميثان والبنزين في المعمل من مصادر غير عضوية وقد تزعم ذلك عالم الكيمياء الروسي منديلييف Mendeleef حيث أمكن تكوين الهيدروكربونات من تفاعل كربيد الحديد iron carbide والموجود في باطن الأرض بكميات كبيرة مع المياه الجوفية تحت ضغط وحرارة شديدة. كما أن هناك افتراضاً عن تفاعل كربونات الكالسيوم المكونة للحجر الجيري مع كبرتيد الهيدروجين H_2S لينتج عن ذلك

غاز الميثان. غير أن هذه النظريات لم تلق تأييداً كبيراً ونالتها اعتراضات عززت من رجاحة نظريات النشأة العضوية للبترول والتي سنتناولها فيما يلي:

النشأة العضوية:

تعزو نظريات نشأة البترول إلى أن مادة المصدر الأولية للبترول (البروتوبتروليوم protopetroleum) كانت عضوية وهي المادة التي تكونت من بقايا الكائنات النباتية أو الحيوانية والتي يدخل في تركيبها العنصران الأساسيان الكربون والهيدروجين، وأن البترول يحتوي على مادة البورفيرين porphyrin والنيتروجين اللتين توجدان في المواد العضوية، كما أن درجة حرارة خزانات البترول لا تزيد إلا في النادر عن مائة درجة مئوية.

ومما يعزز من نظريات النشأة العضوية الاعتبارات الآتية:

- احتواء الصخور الرسوبية بأسماكها الكبيرة على كميات هائلة من المواد العضوية التي سببتها الكائنات النباتية والحيوانية المندثرة والمكونة أساساً من عنصري الكربون والهيدروجين وهما العنصران الرئيسان في تركيب البترول.
- وجود البورفيرين والنيتروجين في البترول، والبروفيرين هي نوع من الصبغات المسئولة عن تلون الدم باللون الأحمر (hemin) والنباتات باللون الأخضر لوجود مادة الكلوروفيل (chlorophyll)، هذا بالإضافة إلى وجود النيتروجين الذي يؤكد أيضاً الأصل العضوي.
- النشاط الضوئي للبترول optical activity: وهي قدرة المادة على إدارة حزمة من الضوء المستقطب، وهي خاصية تتميز بها المواد العضوية دون المواد غير العضوية باستثناء مادتي الزنجفر (السِنَّابار) (HgS) والمرو (SiO_2).

المواد المصدرية للبترول:

عرَّفنا من قبل صخر المصدر بأنه ذلك الصخر الذي يتكون فيه الزيت والغاز الطبيعي نظراً لثرائه بالمواد العضوية التي خلفتها الكائنات النباتية والحيوانية التي دفنت مختلطة بحبيبات الرمل والطين وترسبت في قيعان البحار وساعدت الظروف البيئية السائدة في تحويلها إلى مادة بترولية، وأغلب الظن أن تلك الكائنات كانت من النباتات والحيوانات الأولية وحيدة الخلية مثل الطحالب والدياتوم والفورامينفرا وهي كائنات كانت ولا تزال

موجودة بكثرة في جميع البحار من حقبة الحياة القديمة إلى الوقت الحاضر وهو ما يجعل إمكان كونها مصدراً للبترول في جميع الظروف أمراً كبير الاحتمال والقول بأن نشأة البترول هي نشأة بحرية والدليل على ذلك وجود حوالي ٩٥٪ من حقول البترول البحرية في رواسب بحرية، كما نجد أيضاً أن المواد العضوية الموجودة الآن في الصخور الرسوبية تتكون من مركبات هيدروكربونية معقدة وقريبة من مكونات الزيت الخام والغاز الطبيعي كما هو مبين بالجدول الآتي وهو ما يوضح الارتباط فيما بينها ويمثل التركيب الكيميائي بالوزن لكل من الزيت الخام والغاز الطبيعي والمواد العضوية.

العنصر	المادة العضوية ٪	الزيت الخام ٪	الغاز الطبيعي ٪
كربون	٥٢ – ٧١	٨٤ – ٨٧	٦٥ – ٨٠
هيدروجين	٧ – ١٠	١١ – ١٤	١ – ٢٥
أكسجين	١٥ – ٣٥	٠,٠١ – ٢	٠
نيتروجين	٤ – ٦	٠,٠١ – ٢	١ – ١٥

ومن هذا الجدول يتضح أيضاً أن العنصرين الأساسيين في كل من الزيت الخام والغاز هما الكربون والهيدروجين، ولهذا السبب يطلق على كل من الغاز والزيت لفظ الهيدروكربونات hydrocarbons.

العوامل المؤثرة في تحويل المادة المصدرية إلى بترول:

في ضوء ما سبق نجد أن ثمة مادة معينة ذات تركيب عضوي كانت المصدر الأولي للبترول، ولكن يبقى علينا أن نتعرف على الطرق التي تحولت بها هذه المادة العضوية إلى بترول والتي تتضمن عددا كبيراً من الافتراضات الفيزيائية والكيميائية والجيولوجية، وتتطلب عملية تحول transformation أي مادة عضوية إلى بترول – علاوة على وجودها في بيئة مختزلة – وجود طاقة للقيام بهذا التحول، وقد اقترحت عدة مصادر لهذه الطاقة من أهمها ما يلي:

- **الضغط والحرارة:**

يعتقد الباحثون أن الضغط والحرارة أو كليهما معاً كانا السبب في تحول المادة العضوية إلى بترول، فقد تولد البترول من الصخور الكربونية تحت ضغط عال وحرارة شديدة ثم

وجد مخرجاً جانبياً بين الطبقات إلى المناطق الباردة بعد أن دفعته إلى ذلك الغازات الناتجة، ولكن المواد العضوية الصلبة مثل التي توجد في الطفل الكيروجيني kerogen shale وهو مجموعة معقدة من البقايا العضوية للكائنات الأولية كالطحالب وحبوب اللقاح والحشرات ويتركب كيميائياً من مزيج معقد من مركبات هيدروكربونية ذات جزيئات كبيرة وتشمل الكربون والهيدروجين والأكسجين والنيتروجين والكبريت وتسمى البايروبتيومين pyrobitumen ويلزمها لكي تتحول إلى بترول سائل وغازي حرارة تتراوح بين ٣٥٠-٤٠٠ درجة مئوية الأمر الذي يتعارض مع وجود البورفيرينات في البترول وهذا دليل على أن درجة الحرارة البترول لم تتجاوز ٢٠٠ درجة مئوية، كما أن درجات الحرارة في معظم خزانات البترول لم تصل إلى أكثر من ١١٥ درجة مئوية وأقصى درجة حرارة تم تسجيلها كانت ١٦٥ درجة مئوية في بئر استكشافية على عمق ٢٠٥٢١ قدماً (٦٢٥٦ متراً)، ونظراً لوجود البورفيرين يرى البعض تفسيراً لذلك في عنصر الزمن ليحل محل الحرارة وهو أن بعض التفاعلات إذا ما أعطيت زمناً جيولوجياً طويلاً تتم في درجات حرارة أقل من تلك التي تلزم لها في المعمل.

- **التفاعلات الحفازية:**

تعرف الحوافز catalysts بأنها مواد تساعد في تنشيط وتسريع التفاعلات الكيميائية دون المشاركة فيها، وفي الصخور التحتسطحية حيث لا تكون درجات الحرارة الباطنية مرتفعة عادة فإن وجود الحوافز يعمل على تسريع التفاعلات الكيميائية اللازمة لتحويل المادة العضوية إلى بترول والتي لم تكن هذه التفاعلات لتتم بدونها إلا عند درجات حرارة عالية، وتوجد بعض هذه الحوافز كمركبات داخل البترول من بينها الفناديوم والموليبدنوم والنيكل والتي تدخل كوسائط فعالة في التخليق المعملي للهيدروكربونات، ومن المعتقد أن الكائنات العضوية قد استخلصت هذه العناصر من مياه البحر ثم ظلت بأجسامها لتعمل كحوافز طوال فترة تحلل المواد العضوية، ويبدو أن المعادن الصلصالية التي توجد في الرواسب الطينية التي تختلط بها المواد العضوية تعمل هي الأخرى كحوافز، كذلك فإن المساحات السطحية الواسعة للحبيبات الدقيقة الموجودة في الصخور الخزانية مع المواد الكيميائية المعقدة الموجودة هناك لها دورها هي الأخرى في تحويل المادة العضوية إلى بترول أو على الأقل إلى مادة شبه بترولية.

- **النشاط البيوكيميائي:**

ويقصد بهذا النشاط فعل البكتيريا bacteria action حيث يعتقد الكثيرون أن البكتيريا تعمل بطرق متعددة في مساعدة التحول النهائي للمواد العضوية المتآكلة إلى بترول، ويبني هذا الاعتقاد على أساس ما لوحظ أن كبريتات الكالسيوم والحديد التي توجد في مياه البحر الراكد تتحول إلى كبريتيدات بفعل مستعمرات من البكتيريا النازعة للكبريت التي تزدهر في هذه البيئات، مما ينتج عنه في النهاية الهدم والتحلل المائي للكبريتيدات الفلزية وانبعاث غاز كبريتيد الهيدروجين، ويعتقد أيضاً أنه بإمكان البكتيريا عمل اختزال مماثل لجزيئات الأحماض الدهنية وتحويلها إلى هيدروكربونات، هذا وقد وجد أن رواسب أعماق المحيطات تزخر بكميات هائلة من البكتيريا ولهذه الأخيرة أو لإنزيماتها القدرة على عمل تغيرات كيميائية عديدة في المادة العضوية، وقد استخرجت بكتيريا كثيرة من الرواسب القديمة ومن البترول الذي يوجد على أعماق عدة آلاف من الأمتار.

- **النشاط الإشعاعي:**

يبدو أن الوجود الشائع للمعادن المشعة radioactive minerals في الأرض وما يصاحب ذلك من تفاعلات كيميائية ينتج عنها انبعاثات ذات طاقة حرارية عالية من جسيمات ألفا وبيتا وجاما يجعل من المحتمل أن تساعد بعض الظواهر الإشعاعية في تحول المادة العضوية إلى بترول، وتعتبر جسيمات ألفا alpha particles هي المسئولة عن أكثر من ٧٥٪ من الطاقة التي تتحرر من العناصر الأرضية، وأهم العناصر المشعة الموجودة في الصخور الرسوبية هي اليورانيوم والثوريوم والبوتاسيوم، وهي توجد مصاحبة للمعادن الثقيلة الموجودة في الرمال والأحجار الرملية، كما أن البوتاسيوم النشيط يوجد في الرواسب الملحية وفي أملاح حقول البترول وحجر الصلصال والحجر الجيري غير النقي والمواد العضوية، وقد ظهر أن تحطيم الأحماض العضوية المشعة بتلك الجسيمات المشبعة ينتج عنه هيدروكربونات.

ومن أهم الاعتراضات التي توجه لفعل إشعاعات ألفا في تحويل المادة العضوية إلى بترول أن ذرات الهيدروجين تنقسم في التجارب المعملية على الأقل وهذا يسبب أنواعاً من البترول تزداد كثافتها وتعلو فيها نسبة الكربون على الهيدروجين مع مرور الأزمنة الجيولوجية، بينما يقتضي تحول المادة العضوية إلى بترول ازدياداً متدرجاً في نسبة الهيدروجين على الكربون.

بيئة نشأة البترول:

بغض النظر عن الطريقة التي تولد بها البترول يبدو أن هذا قد تم مباشرة من التحلل الأولي للمادة العضوية والدليل على ذلك هو وجود البترول في صخور الخزان المسامية التي يحيط بها رواسب متماسكة غير منفذة فلا بد أن البترول قد نشأ ثم وصل إلى مكانه الحالي في الخزان الجوفي قبل أن تتماسك الرواسب الموجودة بين مكان النشأة ومكان التجمع.

ويبدو أن البترول قد تكون في بيئة لاهوائية anaerobic environment والدليل على ذلك وجود الكبريتيدات مثل البايريت في الرواسب المصاحبة للبترول، كما أن وجود البورفيرين في البترول الخام دليل آخر على الظروف اللاهوائية لنشأته، حيث إن البورفيرين يتلف في وجود الأكسجين.

ويبدو من التركيب الصخري للرواسب التي يوجد بها البترول أنها قد ترسبت في مياه قليلة العمق، وأن عدم وجود الأكسجين في بيئة نشأة البترول كان بسبب ركود المياه وعدم دورتها، ويحتمل أن التركيز الزائد للأملاح الذي جاء نتيجة للتبخير التدريجي للماء قد تسبب عنه قتل الكائنات الحية والتي عاشت في منطقة مياه بها أكسجين ثم ترسبت المادة العضوية على نطاق واسع في هذه البيئة الجديدة، ويبدو أن عمل البكتيريا الإختزالي واستخلاصها الأكسجين من المادة العضوية قد بدأ حين ترسبت هذه المادة العضوية فوق الطين الراكد الموجود في قاع البحر، وهناك استخلصت البكتيريا الأكسجين من الدهون والأحماض الدهنية وتكون البترول في النهاية.

ويحتمل أن للتبادل القاعدي base exchange في رواسب المصدر تأثيراً على بيئة نشأة البترول فعندما يلامس طين مياه البحر يحدث تبادل قاعدي ويتكون صلصال بوتاسيوم أو صوديوم فإذا تلامس بعد ذلك هذا الصلصال المتبادل قاعدته مع مياه عذبة فإنه يتحلل مائياً مكوناً محلولاً قلوياً لهيدروكسيد الصوديوم أو البوتاسيوم ويصبح غير منفذ، وينتج عن ذلك أن أية مادة عضوية توجد في ذلك الوقت تحت الطين تصبح تحت ظروف لاهوائية وتحجز كل منتجات التحلل تحت الطين ولا تجد مهرباً ما دامت الظروف سائدة. وتلعب درجة الحرارة كما أشرنا دوراً يبدو فاعلاً في نشأة الغاز الطبيعي.

بيئة نشأة الغاز الطبيعي:

تعاظمت في الفترة الأخيرة اكتشافات الغاز الطبيعي natural gas في عدة مناطق من العالم ولعلنا نلحظ تلك الاكتشافات الغازية بدلتا النيل وفي المياه العميقة بالبحر المتوسط وربما كان الفضل في ذلك يرجع إلى التقدم التكنولوجي الهائل في أجهزة وتقنية الاسكتشاف والحفر وكذلك الاهتمام الكبير لاستخدام الغاز الطبيعي كوقود صديق للبيئة، على غير تلك المصادر الأخرى ذات التأثيرات السلبية على البيئة.

ويطلق اسم الغاز الطبيعي على مجموعة من الهيدروكربونات في حاله غازية أكثرها ثباتاً وشيوعاً هو غاز الميثان (CH_4)، كما توجد غازات هيدروكربونية أخرى مثل الإيثان والبروبان والبيوتان والهكسان وغيرها، وقد يحتوي الغاز الطبيعي بالإضافة على غازات غير هيدروكربونية مثل كبريتيد الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون والنيتروجين والهيليوم.

الميثان	٧٠-٩٥٪
الإيثان	١ - ١٠٪
البروبان	٥ >
البيوتان	٢ >

ويوجد الغاز الطبيعي في عدد من البيئات، فقد يكون مذاباً في البترول أو فوق البترول مكوناً غطاء غازياً gas cap أو في نفس التركيب المصيدي للبترول ولكن في الطبقات العليا للخزان، أو في مناطق منتجة للبترول ولكن في مصايد مختلفة، أو في تجمعات بعيدة عن الرواسب البترولية، وإن كان من المحتمل وجود رواسب بترولية كبيرة قرب هذه التجمعات الغازية.

نظريات نشأة الغاز الطبيعي:

هناك نظريتان تفسران نشأة origin الغاز الطبيعي، وتقول النظرية الأولى أن للغاز الطبيعي نشأة مستقلة عن نشأة البترول، ويحتمل أنه لم يكن في وقت ما مصاحباً للبترول السائل، ومن المؤكد أن بعض الغاز قد تكون مباشرة من مواد عضوية متعفنة من غير أن يمر في مرحلة هيدروكربونية سائلة، ومثال ذلك غاز المستنقعات marsh gas أو الميثان، كذلك فقد يوجد غاز الميثان مع غاز الفحم الذي لا علاقة له على الإطلاق بتكوين البترول والذي ينتج من بقايا نباتات المياه العذبة المكونة للفحم والذي يتجمع

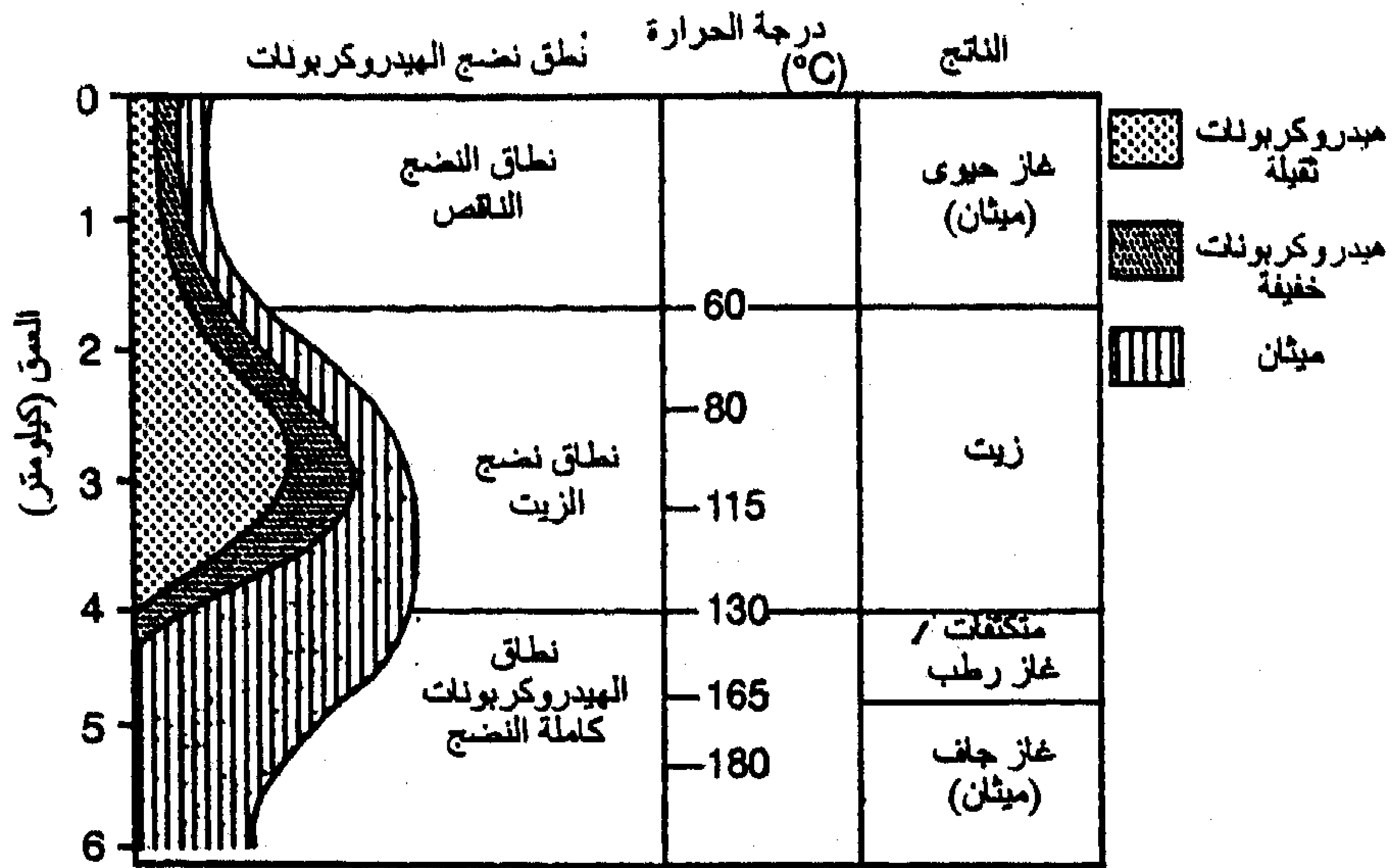
في طبقات الفحم أو الطبقات المسامية فوقها، كما أن البعض يعزو تكوين الميثان إلى عمليات طبيعية غير عضوية حيث وجد في الغازات المنبعثة مع البراكين، وأنه وغازات أخرى هيدروكربونية قد تكونت بالتحول التماسي لاتحاد الكربون الموجود بالصخور الكربونية وبخار الماء الناشئ من تدخل الصخور المنصهرة.

أما النظرية الثانية فهي تحاول تفسير نشأة الغاز على أنه نتاج ثانوي أو نتاج أخير لنشأة وتطور البترول وكان في وقت ما في حالة سائلة وأنه كلما ازداد عمر البترول وعمقه وتعقدت تركيبات الطبقات التي يوجد بها فإنه يتحول مع بعض الاستثناءات من أسفلت إلى هيدروكربونات خفيفة تحتوي على غازات هيدروكربونية.

ومن حيث النشأة يصنف الغاز الطبيعي على نوعين أولهما الغاز الحيوي والآخر الغاز الحراري، ويتولد الغاز الحيوي biogenic gas عند الأعماق الضحلة بالقرب من السطح عندما تكون درجة الحرارة غير كافية لتوليد البترول السائل وحيث تنشط البكتيريا عند هذه الأعماق الضحلة وتتواجد بكميات هائلة تساعد على تحويل المادة العضوية إلى غاز والذي يعرف بغاز المستنقعات marsh or swamp gas ويتكون أساساً من الميثان، وبالطبع فإن هذا الغاز عادة ما لا يجد فرصة مواتية لاصطياده فيتبدد بسرعة، غير أن ثمة عدداً قليلاً من الحالات التي عثر فيها على هذا الغاز، وحقل يورنجوي Urengoy في سيبيريا خير مثال على ذلك والذي يعتقد أنه غني بالغاز الحيوي والذي تم احتجازه أسفل الطبقة الجليدية الدائمة permafrost وحيث يحتوي هذا الحقل على مخزون من الغاز الطبيعي يقدر بنحو ٢٨٥ تريليون قدم مكعبة، وبصورة عامة فإن وجود الغاز الحيوي يتضاءل مع زيادة العمق حيث يتراجع فعل البكتيريا بزيادة درجة الحرارة.

أما الصنف الآخر من الغاز الطبيعي والذي يعرف بالغاز الحراري thermogenic gas فإنه يتولد عند درجات حرارة عالية وعندما يكون الصخر المصدري قد ترسب عند أعماق كبيرة تصل عندها درجة الحرارة إلى أكثر من ١٥٠ درجة مئوية وعندئذ تكون الفرصة سانحة للغاز على حساب البترول السائل، ويبقى الغاز الناشئ على هيئة غاز جاف dry gas أو غاز رطب wet gas حسبما تتهيأ ظروف النشأة لذلك.

والشكل ٩-١ يوضح تأثير درجة الحرارة على نشأة كل من البترول والغاز الطبيعي وارتباط ذلك أيضاً بزيادة العمق.

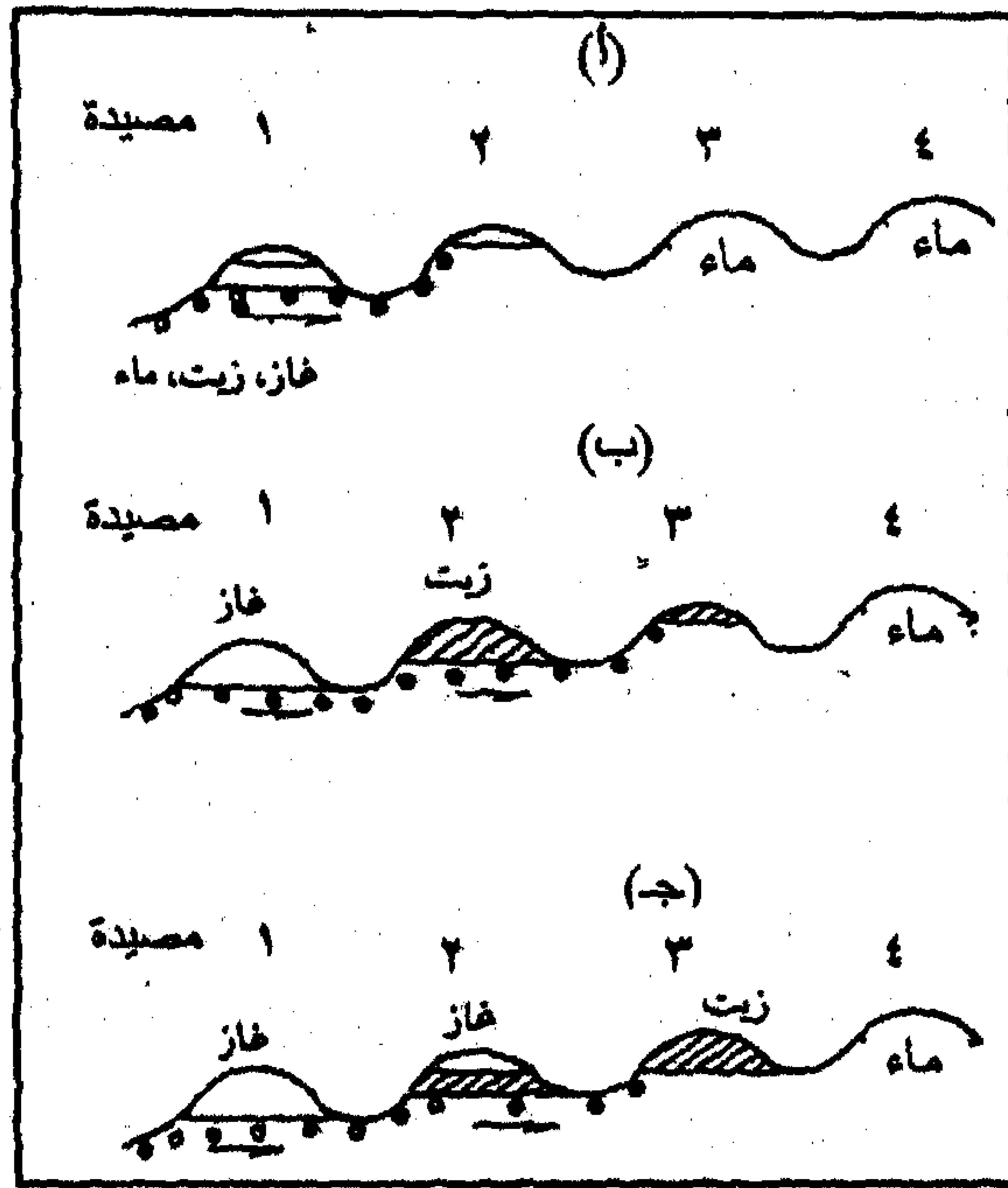


شكل ٩-١: نضج الهيدروكربونات مع درجة الحرارة والعمق.

وللعلم فإن نطاق القشرة الأرضية الذي يتولد فيه البترول السائل يسمى بنافذة أو نطاق الزيت oil window وهو محصور تقريباً ما بين ٢١٠٠ إلى ٥٥٠٠ متر ويكون تولد الزيت الثقيل heavy oil وهو ما يسمى أيضاً بالزيت غير الناضج immature oil عند درجات الحرارة المنخفضة من نافذة الزيت، أما الزيت الخفيف light oil وهو الزيت الناضج mature oil فيتولد عند درجات الحرارة الأعلى، وعند الدرجات المنخفضة بالنسبة للغاز الحراري يكون الغاز المتولد من النوع الرطب أما عند درجات الحرارة المرتفعة يكون الغاز جافاً، وعادة ما يكون تولد الغاز الطبيعي أسرع من الزيت السائل الذي يحتاج إلى فترة زمنية أطول كثيراً.

ومن الأمثلة الجيدة لتطبيق النظرية الثانية لنشأة الغاز هو العثور على الغاز الطبيعي بكميات كبيرة من منطقة الأبلاشيان بالولايات المتحدة (شرق منطقة الاختفاء) حيث تزيد نسبة الكربون على ٦٥٪ وتميل حقول البترول إلى الاختفاء، غير أن أحسن الأدلة على نشأة الغاز أثناء التطور الطبيعي للبترول هو الوجود الدائم للغاز والزيت معاً في الطبيعة، وفي حالات غير قليلة التي عثر فيها على الغاز منفرداً وذلك نتيجة لكون الغاز الطبيعي أكثر قدرة على الحركة من الزيت، وأنه بمجرد انفصاله من الزيت يطرق مسالك لا يمكن للزيت أن يتبعه إليها، ويتجمع بذلك في خزانات منفصلة، وبالرغم من أنه لا يمكن إنكار النشأة

المباشرة للغاز من المادة العضوية المتعفنة فإننا لا يمكن أن نعزو لها تكوين التجمعات الرئيسة للغاز الطبيعي، وحسب هذا التصور يمكن لنا أن نسوق المبدأ الذي قدمه جاسو Gussow (1953) حول الاصطياد التفاضلي للهيدروكربون differential entrapment of hydrocarbones داخل الخزانات الجوفية. وهذا يعني إمكانية عثورنا على الغاز أسفل الميل وعلى الماء أعلى الميل. ويمكن أن نوضح ذلك من خلال الرسم التخطيطي التالي لأربع مصايد متتالية لطيات محدبة (شكل ٩-٢). ففي بادئ الأمر يندفع الزيت والغاز المتولدين في الصخر المصدر إلى المصيدة حيث يقوم الغاز بملئها وإذا كان هناك فائض من الغاز يندفع كل من الزيت والغاز عن طريق نقطة التصريف إلى المصيدة ليملأها، وإذا لم يكن هناك فائض من الغاز يندفع الزيت بمفرده - إن كان ما زال موجوداً بوفرة لملء المصيدة ٣، وعليه تبقى المصيدة ٤ خاوية ومليئة بالماء في حالة عدم توفر مدد آخر من الزيت، وهو ما يفسر لنا أحد أسباب العثور على مصايد خاوية بالرغم من موقعها التركيبي أعلى الميل.

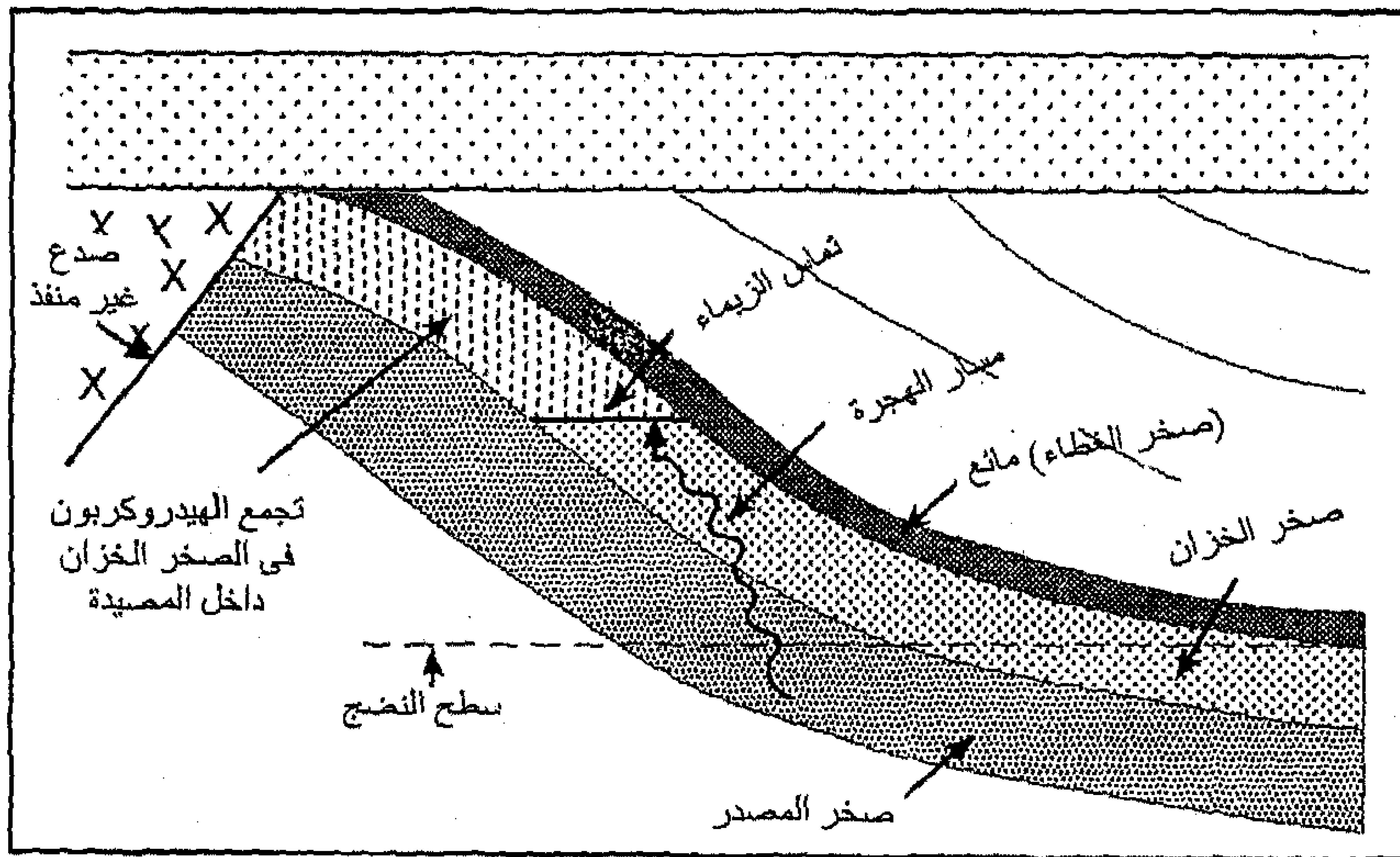


شكل ٩-٢: رسوم توضيحية لنظرية جاسو عن الاصطياد التفاضلي للهيدروكربونات وإمكانية العثور على مصايد خاوية أعلى الميل التركيبي بسبب التحركية التباينية للهيدروكربونات عبر نقاط التصريف وكذا الكميات المتوافرة منها. في الحالة (أ) المصيدتان ٣ و٤ خاويتان ومليئتان بالماء، وفي الحالتين (ب) و(جـ) المصيدة ٤ خاوية ومليئة بالماء.

الفصل العاشر
هجرة وتجمع البترول

البترول مهاجراً:

بعد تكون الزيت والغاز في الصخر المصدر والذي يعتبر وسطا غير منفذ فإن البترول يشق طريقه إلى خارج المنطقة حيث يؤدي وجود هذه الموائع إلى زيادة في الحجم تعمل على إحداث إجهادات على الصخر المصدر وتكسيره واندفاع الهيدروكربون إلى الانسياب خلال الشقوق المستحدثة والتي تلتئم فيما بعد وتنغلق ويصبح الصخر غير منفذ من جديد، ونظراً لأن الزيت والغاز أقل في كثافتهما من الماء الطبقي والموجود بين المسام الصخرية فإن البترول والغاز يرتفعان إلى أعلى عبر الشقوق والمسام كما يمكن لهما الحركة جانبياً وإلى أعلى عبر سطح التطبق واللاتوافق خلال الطبقات الحاملة carrier beds والتي تتميز بنفاذيتها العالية وقدرتها على نقل الموائع خلالها، ويطلق على الانسياب الخارجي والرأسي من صخر المصدر بالارتحال أو الهجرة migration، وإذا لم توجد المصيدة البترولية فإن هذه الموائع تستمر في انسيابها وتسربها إلى السطح، أما إذا وجدت المصيدة في طريق الهجرة فإن البترول سوف يتجمع داخل المصيدة التحتسطحية (شكل ١٠-١).



شكل ١٠-١: نشأة وهجرة واصطياد الهيدروكربونات داخل الخزان الجوفي.

والجدير بالذكر أن حجم ما يصل إلى المصيدة من الزيت والغاز يتروااح فقط ما بين ٠,٠٣٪ و٣٦٪ وفي المتوسط ١٥٪ من إجمالي حجم الهيدروكربون الذي تكون في الصخر

المصدر حيث يفقد أيضاً جزء من هذا الهيدروكربون خلال رحلة الهجرة وأيضاً بسبب التسرب إلى السطح. وكما سبق أن ذكرنا فإن الغاز تكون نشأته في الحوض الترسيبي عند الأعماق الكبيرة مقارنة بنشأة الزيت ولكننا أحياناً ما نجد صورة مخالفة حيث تم العثور على زيت خفيف وغاز طبيعي عند أعماق ضحلة نسبياً كما حدث في حوض ويليستون Williston في ولاية مونتانا الأمريكية حيث استطاع البترول الهجرة إلى أكثر من ٣٢٠ كيلومتر على طول سطوح الطباقية من الصخر المصدر حتى المصايد الموجودة على أطراف الحوض الترسيبي القريبة من سطح الأرض. وتسمى حركة البترول الأولى من صخر المصدر إلى صخر الخزان بالهجرة الأولية primary migration تمييزاً لها عن حركتها الأخيرة داخل صخر الخزان المسماة بالهجرة الثانوية secondary migration التي ينفصل فيها البترول عن الغاز والماء استعداداً لتجمعه في البركة التحتسطحية.

الأدلة المعارضة والمؤيدة لهجرة البترول:

يجمع الجيولوجيون المتخصصون على أن هجرة البترول أمر واقع ولكن الاختلاف فيما بينهم حول مقدار الهجرة والمسافة التي هاجر البترول إليها حيث يعتقد البعض أن هذه الهجرة ليست بالمسافة الطويلة، وفيما يلي بعض الأدلة المعارضة للهجرة الطويلة للبترول:

- وجود البترول في أجسام عدسية رملية محاطة تماماً بالطفل السميك وبالتالي فليس لها أي اتصال منفذ مع مناطق المصدر الخارجية مما يصبح من العسير أن يكون مصدر هذا البترول مكاناً آخر داخل صخر الخزان نفسه أو داخل الصخور المتاخمة.
- وجود أنواع مختلفة من البترول في خزانات بترولية وطبقات مختلفة متعاقبة في حقل بترولي واحد وهذا يدل على أنه لم يكن هناك اختلاط بين هذه الأنواع البترولية.
- يعتقد أنه من الصعب تصور هجرة واسعة للقطرات البترولية المنتشرة في الفراغات الصخرية إلى طبقات ذات ميل ونفاذية قليلة وهي التي توجد في كثير من المناطق المنتجة للبترول في العالم إلا إذا قلت لزوجة البترول مع زيادة الحرارة والغاز المذاب في الطبقات العميقة.
- إذا كان البترول يتجمع بعد هجرة طويلة من مصدر بعيد لوجب أن تحتوي كل مصيدة على بترول وللزم أن تحتوي صخور الخزان البترولي المملوءة بالماء والموجودة تحت البرك البترولية على آثار البترول التي مر خلالها.

أما الآراء المؤيدة للهجرة الطويلة للبترول فإنا نسوق بعضاً منها على النحو التالي:

- وجود النشع البترولي دليل على الحركة الطبيعية للبترول، إذ إن البترول الذي يظهر الآن على السطح لابد أنه هاجر من خزانات بعيدة مدفونة في الأعماق.
- وجود معظم الرواسب البترولية ذات القيمة الاقتصادية في صخور لا يحتمل أنها كانت تحتوي على كائنات المصدر التي نشأ فيها البترول؛ لذا لابد أن يكون البترول قد هاجر من موقع المصدر إلى الخزان، فالحجر الرملي وهو أكثر صخور الخزان البترولي شيوعاً يترسب في ظروف غير مواتية لنمو وحفظ الكائنات العضوية، وقد يكون الحجر الجيري والذي يلي الحجر الرملي في الأهمية كصخر خزاني عضوياً ولكن من غير المحتمل أن البترول كان أصيلا imdigenous في هذا الصخر إذ إن جزءاً كبيراً من مسامية الحجر الجيري نشأت بعد التحجر والظهور وجاءت نتيجة لتصفية المحاليل solution leaching ومن الصعب أن نتصور بترولا أصيلا في الأحجار الجيرية ينتظر حتى تتكون الفراغات بفعل تصفية المحاليل، وحتى في حالة الفراغات الأصلية في الحجر الجيري كما في حالة الشعب فإن البترول قد هاجر إلى المنطقة المسامية من الخارج.
- وجود البترول في الصخور المتداخلة والصخور النارية دليل قوي على هجرته إلى هذه الأماكن إذ من المستحيل أن يكون البترول أصيلاً في هذه الصخور.
- التغيرات الكثيرة التي طرأت على المصيدة البترولية عبر تاريخها الجيولوجي لابد أنها تغير من وضع البترول في هذه المصيدة البترولية حتى يتواءم البترول من ناحية توازن الجاذبية مع الوضع المتغير للمصيدة.
- استخراج الزيت والغاز الطبيعي من الخزانات الجوفية يبين إمكانية حركة هذه الموائع خلال الصخور المنفذة ومنها إلى البئر المنتجة، وتتراوح المسافة التي يقطعها البترول في هذه الحركة نحو ٠،٢ – ١،٦ كيلومتر وقد تزيد هذه المسافة كثيراً إذا أعطى البترول وقتاً أطول للحركة وفسحة أوسع wider spacing بين آبار الاستخراج.

الهجرة الجانبية والهجرة الرأسية:

كما أسلفنا تكون هجرة البترول من صخر المصدر إلى صخر الخزان إما جانبية أو رأسية ويعتقد البعض أن وجود البرك البترولية الواحدة فوق الأخرى في عدد من الحقول، كما في حقل باكو بأزربيجان، يعني أن البترول قد هاجر إليها رأساً من البرك الموجودة تحتها على أعماق أبعد وذلك عن طريق الشقوق والصدوع الموجودة في الصخور الخازنة.

إلا أن الأدلة تشير إلى أن الهجرة الجانبية lateral migration هي الأساسية، ويمكن تلخيص الاعتراضات على الهجرة الرأسية على النحو التالي:

- أن وجود رمال مشبعة بالماء متداخلة بين طبقات منتجة للبترول والغاز دليل جيد على عدم حدوث الحركة الرأسية للبترول، وإلا فكيف نفسر أن البترول لم يترك جزءاً منه أثناء مروره في الرمال الحاملة للماء؟؟ أو كيف نعلل أن البترول قد مر في بعض الرمال المشبعة بالماء واحتجزه البعض الآخر؟
- يدل الاختلاف في نتائج تحليل البترول الموجود في طبقات مختلفة على عدم وجود صلة حالية بين هذه الأنواع المختلفة من البترول.
- يدل إحكام كثير من المصايد البترولية بواسطة الصدوع على أن هذه الصدوع لا يمكن اعتبارها بشكل عام ممرات لهجرة البترول، وإن كان من المحتمل أن الصدوع والشقوق قد سمحت ببعض الهجرة الرأسية في وقت من الأوقات قبل إحكام غلقها.

آلية الهجرة ونظرياتها:

تتوقف حركة البترول خلال الصخر المسامي على نوع الهجرة وهل هي هجرة أولية أم ثانوية؟ وفي حالة الهجرة الأولية تكون القوى الهيدروليكية هي الغالبة، أما في الهجرة الثانوية فإن نظرية الطفو أو الخفة بالنسبة للموائع المختلفة هي الأكثر شأناً، وفيما يلي وصف موجز لنظريات الهجرة المختلفة.

- **القوى الهيدروليكية والإحكام hydraulic forces (compaction)** : تقوم هذه النظرية على أساس أن هجرة البترول تحدث تحت التأثير الشديد للتيارات المائية

قبل أن تحكم وتنضغط الرواسب المتجمعة، فعندما يستمر ترسب مجموعة كبيرة من الرواسب فوق قاع بحري مستمر الهبوط فإن تزايد هذه الرواسب فوق الطبقات السفلية يؤدي إلى تعرض الرواسب لضغط عمودي متزايد يؤثر بدرجات مختلفة على الطبقات المتباينة، فإنه بينما تقاوم حبيبات المرو الموجودة في الرمال الضغط مقاومة شديدة قبل أن تسحق وتقلل بذلك مسامية الرمال نجد أن الصلصال وهو الذي يتكون من خليط من الغرين ومعادن قشرية flaky minerals وغرويات يمكنه الانضغاط كثيراً لنحو ربع حجمه الأصلي وقت الترسيب كما يمكنه أن يمتص كمية كبيرة من الماء الذي يخرج بعد ذلك تحت تأثير ضغط الرواسب المتراكمة، فإذا خرجت المياه من الصلصال تحت تأثير حمل الرواسب التي تعلوه فإنها تسير إلى أقل المسالك مقاومة وهي الرمال المجاورة بدلاً من أن تسلك الطريق الطويل إلى السطح، فإذا كانت الطبقات الصلصالية تحوي بترولا فإن البترول يعصر منها تحت تأثير الضغط الناشئ من استمرار تراكم الطبقات فوقها وتخرج معه المياه كذلك ويسري الاثنان معاً في تيارات الإحكام إلى الرمال المجاورة ومنها تسير المياه إلى الطبقة المسامية التالية ثم إلى السطح ويبقى البترول في الرمل الخشن ويصعب عليه الخروج منه بعد ذلك ويعمل السطح الفاصل بين الرمل الخشن والصلصال الذي يعلوه كمرشح أو مصفاة تسمح للمياه بالمرور للخارج بينما تحجز البترول داخلها.

- **التعويم** buoyancy (gravity or floatation): تعتمد هذه النظرية على أساس الجاذبية (الطفو) فالبترول أثقل من الغاز وأخف من الماء، وفي ذلك ما يكفي لتفسير حركة البترول أثناء عملية الهجرة الأولية والثانوية إلا أن هذا التفسير يتجاهل الخلاف الواضح بين حركة السوائل خلال مسام الصخور وتأثير الجاذبية في فصل السوائل ذات الكثافة النسبية المختلفة، فالمسام الصخرية تعتبر كمجموعة معقدة من ممرات دقيقة شعرية متصلة حول وبين الحبيبات الصخرية ولابد أن سريان البترول خلال هذه الأنابيب الشعرية المشبعة بالماء يثير صعوبات واضحة نظراً للتوتر السطحي surface tension إذ إن أي قطرة من البترول لا يمكنها الحركة إلا إذا كانت قوة طفوها أكثر من التوتر السطحي ولا يتوافر هذا إلا في

القطرات التي يصل قطرها إلى واحد مليمتر أو أكثر، أما في حالة القطرات الصغيرة فإن تأثير التوتر السطحي يزيد على قوة الجاذبية وتظل قطرة البترول بدون حركة، وعلى العموم ففي الخزان الجوفي المشبع بالماء يكون الزيت الأخف كثافة قادراً على الحركة إلى أعلى.

- الخاصية الشعرية capillarity: تبني نظرية الخاصية الشعرية على أساس أنه في مزيج من البترول والماء يميل البترول وهو ذو توتر سطحي منخفض للسريان في الصخور ذات المسام الشعرية المتسعة بينما يميل الماء وهو ذو توتر سطحي أكثر إرتفاعا للسريان في الصخور الدقيقة للحبيبات، وتشمل القوى المشتركة في هذه العمليات الضغوط الشعرية تقاومها الضغوط الإزاحية، فإذا تلامس مثلاً طفل وحجر رملي وكان كل منهما يحتوي في الأصل على بترول وماء في حالة متصلة فإن الضغط الشعري في الحجر الرملي وهو أقل منه في الطفل نظراً لاتساع فتحاته المسامية يسبب امتصاص الطفل للماء من الرمل ودفعه في الوقت نفسه بتروله إلى الرمل بحيث تتبادل المياه الموجودة أصلاً في الرمل مع الزيت الموجود من قبل في الطفل، ويعتقد على ذلك أن الضغوط الشعرية يمكن أن تفسر بعض حركة الموائع داخل صخر الخزان ولكن هذه الحركة لا تعدو أن تكون محدودة في أماكن تلامس الزيت والماء أو إعادة التوزيع الجزئي للماء والزيت بين الأجزاء الدقيقة الحبيبات من صخور الخزان، أما أهم تأثير للخاصية الشعرية فهو في وضع البترول في التكاوين المنفذة بحيث يسهل عليه الهجرة بعد ذلك بطرق أخرى.

- تمدد الغاز gas expansion: يعتبر تمدد الغاز المضغوط (الذي يوجد في معظم البرك البترولية والذي يتميز بلزوجة شديدة الانخفاض وخفة عالية بالنسبة للزيت والماء ويتأثر أكثر منها بتغيرات الحرارة والضغط) عاملاً مهماً في حركة البترول من صخر الخزان إلى البئر المنتجة، وقد تبين من التجارب المعملية أنه إذا ما دفع الماء المذاب به كمية قليلة من الغاز في رمال مشبعة بالماء منتشر بها بترول فإن البترول يهاجر بسرعة إلى أعلى الأماكن ذات الميول المنخفضة، وبصفة عامة يعتقد أن وجود الغاز في الخزان الجوفي يسهل من حركة الزيت في هذه الخزان، حيث يكون الزيت المتحرك فيلماً رقيقاً حول فقاعات الغاز.

تجمع البترول:

لكي يمكن للبترول التجمع accumulation في الخزان الجوفي لابد من توافر المصيدة وتكونها قبل بدء الهجرة إلى هناك، وإذا ما تكونت المصيدة في وقت لاحق فإننا لن نعثر على البترول بتلك المصيدة، وإذا كانت الظروف مواتية وتمت بالفعل هجرة البترول إلى داخل المصيدة فإن الموائع الثلاثة (الغاز والزيت والماء) سوف تنفصل عن بعضها وتستقر في الخزان الجوفي حسب كثافتها، حيث يتجمع الغاز في أعلى المصيدة يليه الزيت ثم الماء الذي يتخذ من الجزء السفلي للمصيدة مستقراً له نظراً لأنه أثقل من حيث الكثافة مقارنة بالزيت والغاز، كما يغطي المصيدة صخر مانع لتسرب الموائع يعرف بصخر الغطاء أو الصخر اللاحم (راجع شكل ١٠-١)، وتعتبر طبقات الطفل والملح من الصخور اللاحمة الشائعة، كما يعمل أحيانا الحجر الجيري المتماسك والميكريت والطباشير والطبقات الجليدية الدائمة كصخور غطاء جيدة.

وتعتبر البركة المشبعة saturated pool هي أكثر المصايد شيوعاً ويحتل قمتها غاز حر free gas cap وهذا يعني أن الزيت قد أذاب كل الغاز وبإمكانه إذابة جزء آخر لو كان متوافراً. وهناك في بعض الأحيان نعثر على الغاز الذي يعلو الماء الطبقي مباشرة ومنفرداً دون الزيت، وكما أشرنا من قبل تسمى الحدود الفاصلة بين الموائع المختلفة بالتماسات contacts وهي حدود وهمية عادة ما تكون مستوية أو مائلة في أحيان قليلة خاصة بالمناطق ذات النشاط الديناميكي المائي hydrodynamic activity وقد تكون هذه التماسات حادةsharp أو متدرجة gradational حسب ظروف الضغط الشعري.

العمر الجيولوجي للبترول:

من الدراسات الحقلية تبين أن العمر أو الزمن الجيولوجي للبترول متفاوت من يوم نشأته وهجرته وتجمعه داخل الخزان الجوفي، فهناك ما هو قديم للغاية في عمره وما هو حديث للغاية، فالبترول موجود في حقب ما قبل الكمبري حتى الحديث، بل أن بعض التجمعات البترولية لا يتجاوز عمرها المليوني سنة كما هو مشاهد في منطقة خليج المكسيك ومناطق أخرى، كما أنه من المحتمل أن يكون بعض البترول لا يزال في مرحلة تولده بل وقد يجري تجمعه أيضاً في وقتنا الحاضر، الأمر الذي يعطي آفاقا مستقبلية جيدة حول استمرار البترول في إستراتيجيته الاقتصادية البالغة.

بتروفيزيائية صخر الخزان:

نظراً لأن الصخر الخزاني أو صخر الخزان reservoir rock هو الصخر القادر على تخزين ونقل الموائع لذا فهو يتميز بخاصيتين بتروفيزيائيتين أساسيتين هما المسامية والنفاذية، بجانب درجة تشبعه بالموائع.

- **المسامية:**

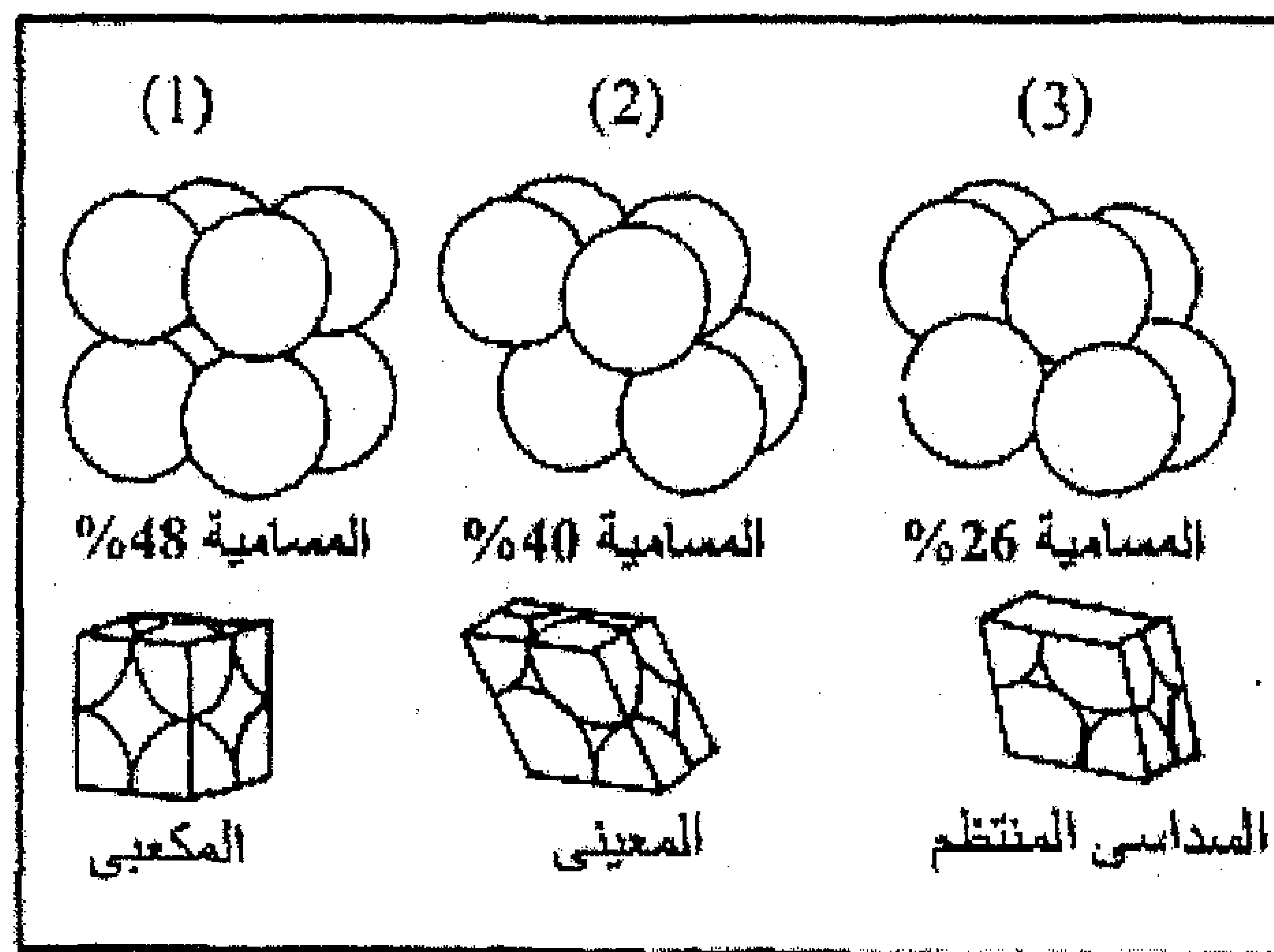
وتعرف المسامية porosity بأنها النسبة المئوية لذلك الحجم من الصخر الذي لا يشمل الأجزاء الصلبة منه، والتي تعرف بالفراغات المسامية pore space أو اختصاراً بالمسام pores، وتحت السطح تكون هذه المسام مملوءة بالموائع مثل الماء والغاز والزيت. والمسامية هي في الواقع مقياس للقدرة التخزينية للصخر الخازن، ويلزم لتعيين المسامية تقدير قياسين هما: حجم المسام والحجم الكلي للصخر وذلك حسب المعادلة التالية:

$$\text{النسبة المئوية للمسامية} = \frac{\text{حجم المسام}}{\text{الحجم الكلي للصخر}} \times ١٠٠$$

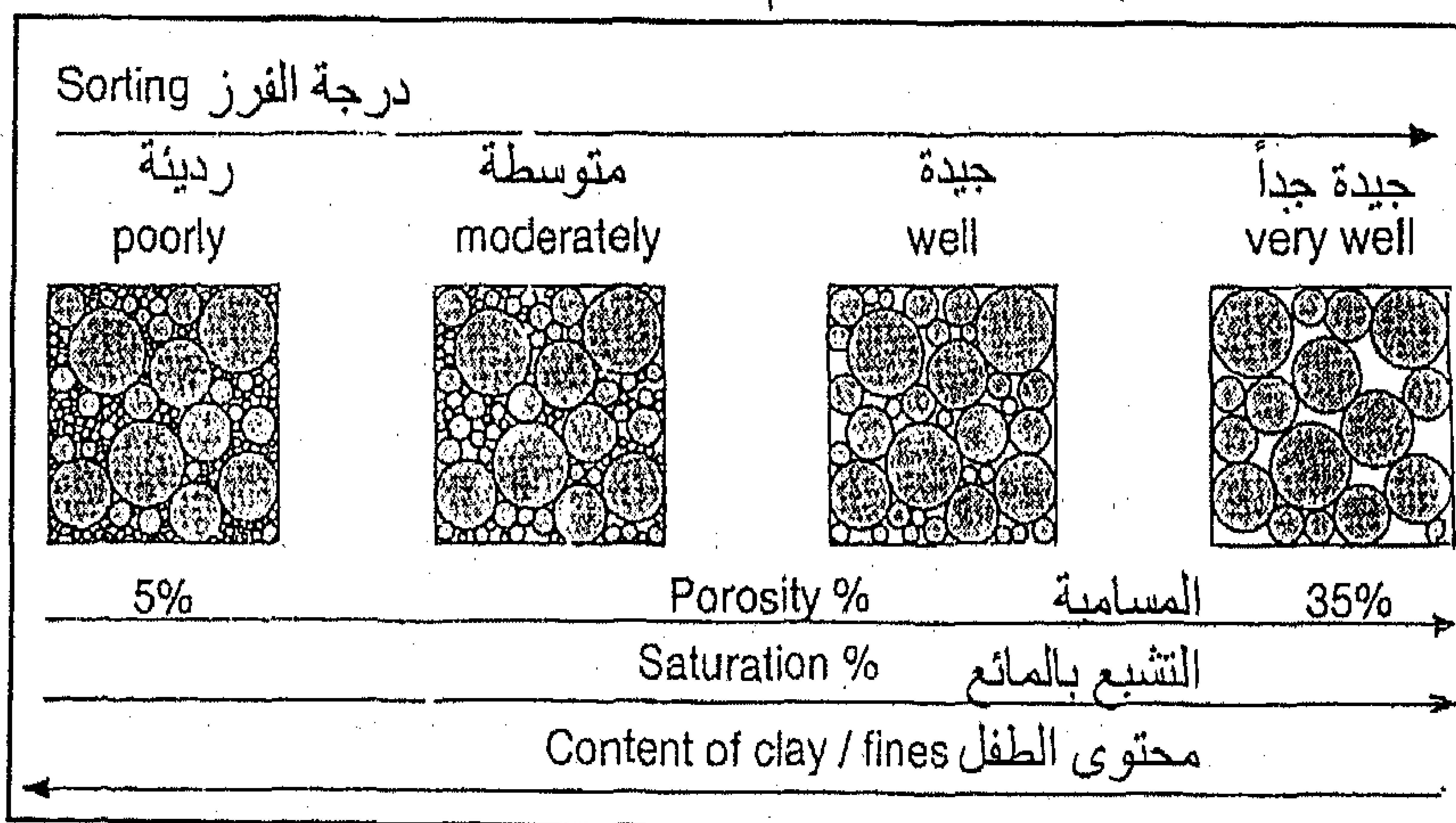
ويوجد نوعان لمسامية الصخر يسمى أحدهما المسامية الكلية total porosity وهي النسبة المئوية لحجم كل المسام الموجودة في وحدة من الصخر إلى حجمها الكلي، ويسمي النوع الآخر المسامية الفعالةeffective porosity وهي النسبة المئوية لكل المسام المتواصلة interconnected pores لوحدة صخرية إلى حجمها الكلي وتكون هذه عادة أقل بنسبة تتراوح بين ٥٪ و١٠ ٪ من المسامية الكلية ، وبالطبع فإن قيمة المسامية الفعالة هي التي تهم في هجرة البترول وتجمعه، فالصخر التي تكون له مسامية كلية عالية ومسامية فعالة منخفضة مثل حجر الخفاف pumice قد يتشبع بالبترول دون أن يمكن استخراجه منه، حيث إن الزيت لا يجد في الصخر طريقاً يسير خلاله نظراً لضعف المسامية الفعالة.

وفي صخر الحجر الرملي غالباً ما تقترب المسامية الفعالة من قيمة المسامية الكلية حيث تكون الفراغات المسامية على اتصال فيما بينها، أما بالنسبة للصخور الكربوناتية فإن مساميتها تتباين بشكل كبير ومن ثم يجري تصنيفها على أنها مسامية أولية (أصلية) primary or original أو مسامية ثانوية secondary، والمسامية الأولية هي تلك التي تكونت أثناء عملية الترسيب أو بعدها بقليل، أما المسامية الثانوية فهي تلك التي تكونت في

وقت لاحق بعد ترسيب الصخر وتعرضه لعمليات جيولوجية لاحقة diagenetic processes مثل الإذابة أو السمنتة أو الدلمتة أو إعادة التبلور أو التشقق، وقد يعمل ذلك على تحسن أو تدني الخصائص الخزانية للصخر، وكثيراً ما تعمل عملية الدلمتة على زيادة مسامية الخزان الجوفي، أما الانضغاط compaction فينشأ عنه تغيير في نظام ترتيب الحبيبات الصخرية وتزاحمها packing من النمط المكعبي ذي المسامية العالية (٤٨٪) إلى النمط المعيني (٤٠٪) إلى النمط الموشوري السداسي ذي المسامية الأقل (٢٦٪) كما هو موضح بالشكل ١٠-٢، كما تلعب درجة الفرز sorting في زيادة أو إنقاص المسامية كما سبق الإشارة إلى ذلك (شكل ١٠-٣).



شكل ١٠-٢: تأثير تزاحم الحبيبات على مسامية الصخر.



شكل ١٠-٣: تأثير الفرز على جودة الخزان الجوفي.

وتتراوح مسامية معظم الخزانات البترولية بين ٥٪ و٤٠٪ وتكون في الأغلب ما بين ١٠٪ و٢٠ ٪ ولا يعتبر الخزان عامة له قيمة اقتصادية إلا إذا كانت مساميته أعلى من ٥٪ أو أن ثمة عوامل أخرى معوضة مثل وجود الشقوق أو الكهوف التي لا تظهر في القطاعات الصغيرة من الصخر، وتطلق الاصطلاحات الحقلية الآتية على نسب المسامية المختلفة.

الصفة	النسبة المئوية للمسامية
مهملة negligible	صفر ـ ٥
ضعيفة poor	٥ ـ ١٠
متوسطة fair	١٠ ـ ١٥
جيدة good	١٥ ـ ٢٠
جيدة جدا very good	٢٠ ـ ٢٥

وتقدر المسامية في بداية الأمر من العينات الصخرية المستخرجة من الآبار حيث يقوم الجيولوجي القائم على البئر بتحديد أنواع الصخور وفحص العينات تحت المجهر للتعرف على ما تحتويه من مسام على نحو لا بأس به وتكون قيمة المسامية في حدود خطأ مقبول.

كما يمكن قياس مسامية الصخر بدرجة أكثر دقة عن طريق العينات اللبية cores المستخرجة من الآبار بعد قطع سدادات plugs أسطوانية الشكل يتراوح قطرها ما بين ١ إلى ١،٥ بوصة وطولها ما بين ١ إلى ٣ بوصة ثم تجفف هذه السدادات لإزالة ما قد يكون عالقاً بها من سوائل وذلك قبل إجراء القياسات عليها بجهاز يسمى مقياس المسامية porosimeter.

وإضافة إلى ذلك يمكن تقدير المسامية بواسطة بيانات تسجيلات الآبار حيث أثبتت السجلات الإشعاعية والصوتية كفاءة كبيرة في هذا المجال وأصبح الاعتماد على نتائجها أمراً ضرورياً وعملياً وسوف نتناول ذلك بالتفصيل فيما بعد، وبصورة عامة فإن قياس المسامية أمر سهل نسبياً، وعليه فإن يمكن اختيار ما يعرف بقطع المسامية porosity cut off وهي القيمة الصغرى للمسامية التي يمكن استخدامها في المساعدة على اتخاذ قرار بشأن إكمال البئر وإعدادها للإنتاج، وتتراوح هذه القيمة ما بين ٨٪ و١٥٪ في خزانات الحجر الرملي، إلا أن الحجر الجيري يتميز بوجود الشقوق

التي ترفع من كفاءته الإنتاجية، وبالطبع فإن قيم القطع سوف تختلف من منطقة لأخرى وترتبط أيضاً بعمق الخزان الجوفي واقتصاديات البئر المزمع إنتاجها.

• **النفاذية:**

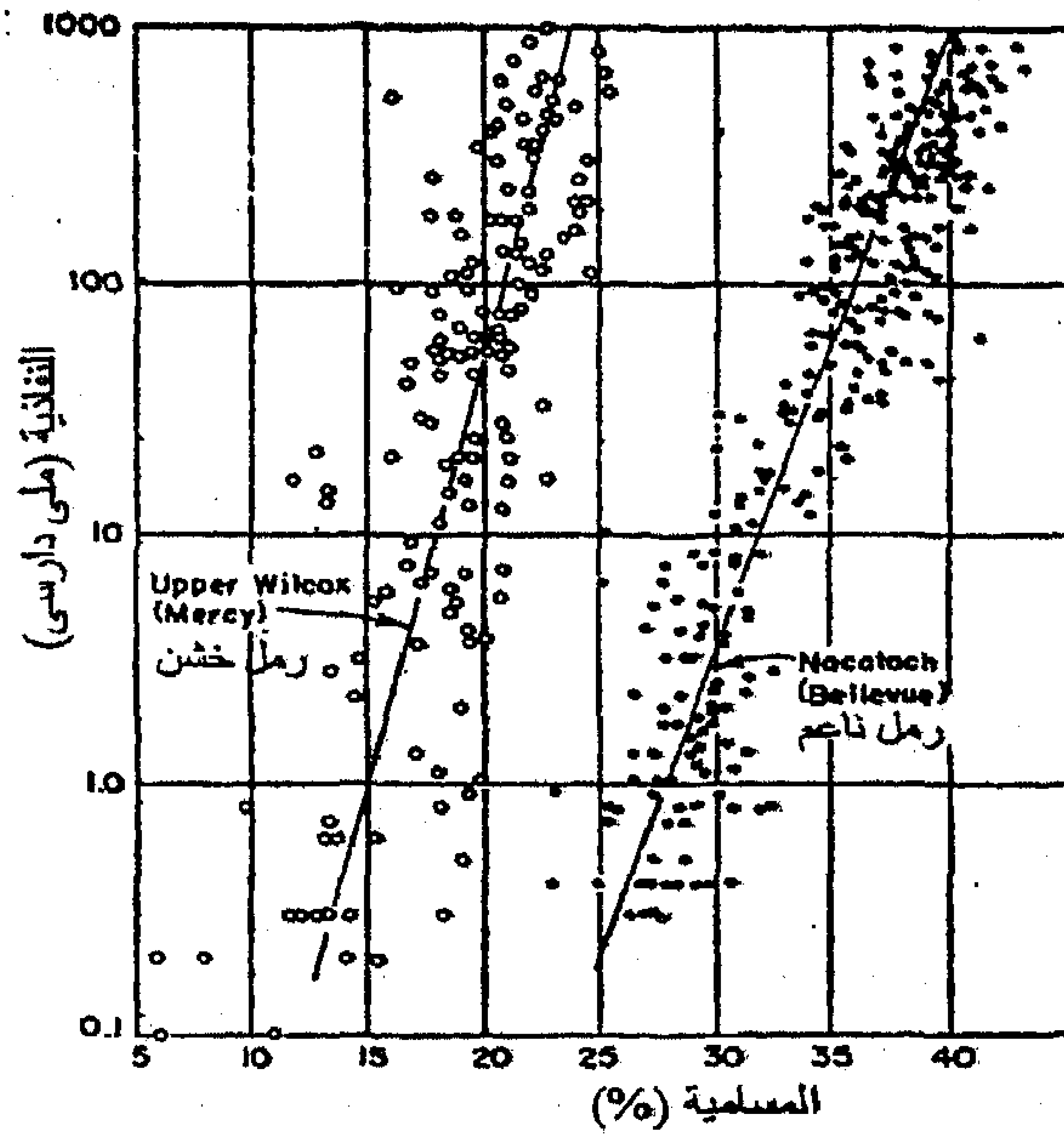
وهي الخاصية الثانية المرافقة لمسامية الخزان، وتعرف النفاذية permeability بأنها قدرة الصخر على إمرار الموائع خلال مسامه، ووحدة القياس هي الدارسي نسبة إلى العالم الفرنسي Darcy والملي دارسي وحدة أصغر وتساوي ١ : ١٠٠٠ من الدارسي، والدارسي هو النفاذية التي تسمح بانسياب سنتيمتر مكعب في ثانية واحدة لمائع ذي لزوجة تقدر بسنتي بواس واحد لمسافة سنتيمتر خلال مساحة سنتيمتر مربع تحت ضغط تفاضلي يقدر بضغط جوي واحد، وكلما تعاظمت النفاذية كان انسياب الموائع خلال الصخر سهلاً.

ويجري قياس النفاذية باستخدام السدادات الصخرية المقطوعة من العينات اللبية، وبعد تجفيف هذه السدادات يمرر خلالها الهواء أو النيتروجين وتتم عملية القياس بواسطة الجهاز المعروف بمقياس النفاذية permeameter ويوضح الجدول الآتي قيماً مثالية للنفاذية والتقديرات الحقلية لها:

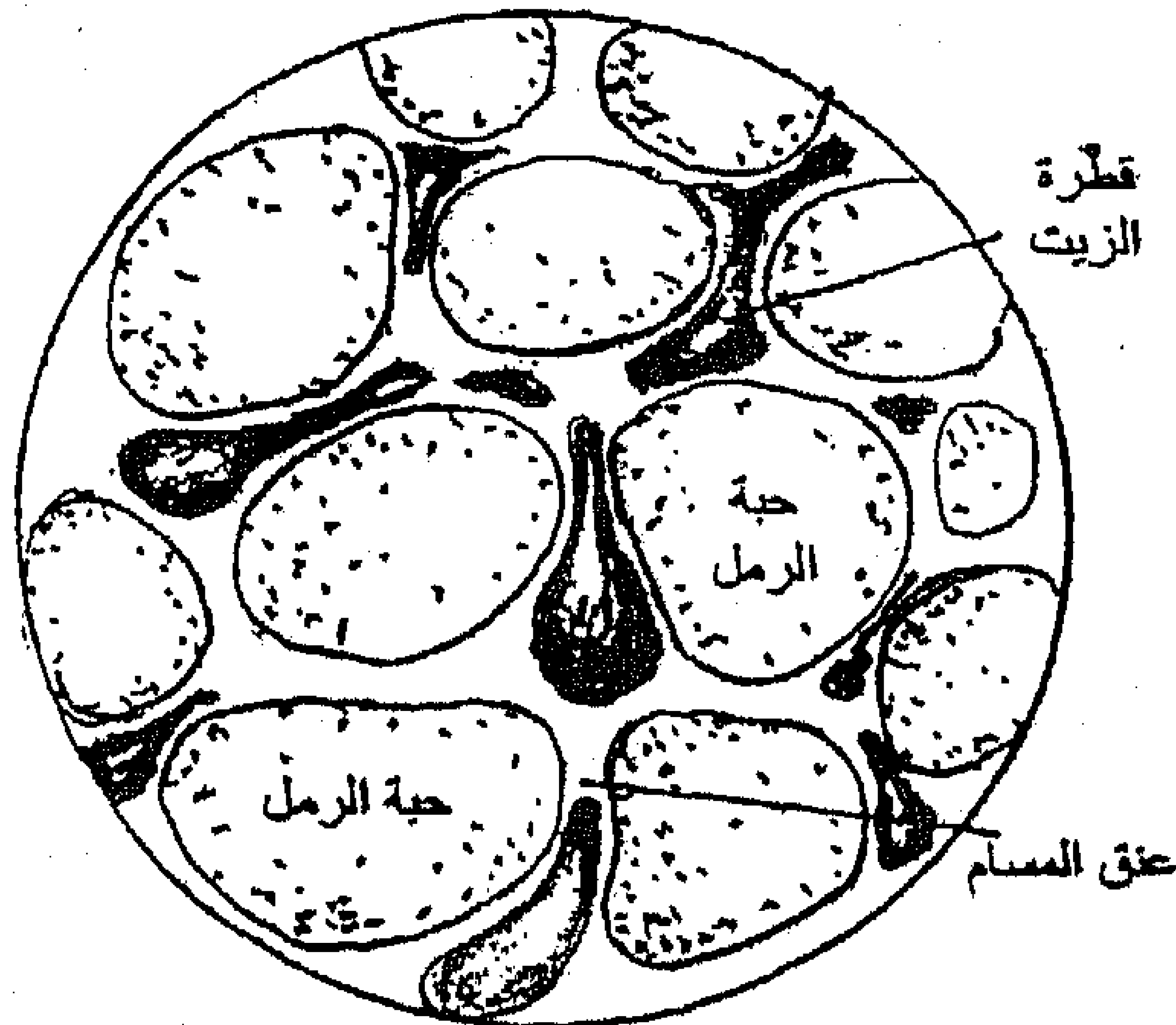
الصفة	النفاذية (ملي دارسي)
ضعيفة poor	١ ـ ١٠
جيدة good	١٠ ـ ١٠٠
ممتازة excellent	١٠٠ ـ ١٠٠٠

وترتبط نفاذية الصخر الخزان عادة بمساميته، وكلما زادت المسامية ارتفعت النفاذية، حيث توجد بين هذين المتغيرين علاقة طردية وخطية (شكل ١٠-٤)، وفي بعض الأحيان قد يصل معامل الارتباط بينهما إلى ما يقرب من الوحدة إلا أن النفاذية يحكمها في المقام الأول حجم الحبيبات التي يتكون منها الصخر، وأصعب مكان لكي ينساب الزيت أو الغاز هي تلك الوصلات الضيقة narrow connections والتي تعرف بأعناق المسام pore throats وكلما ضاقت هذه الأعناق صعب انسياب الموائع، وكلما كان حجم الحبيبات دقيقاً صغرت أعناق المسام، ولهذا السبب فإن الصخور المسامية والكبيرة الحبيبات تكون عادة شديدة النفاذية (شكل ١٠-٥) أما الصخور المسامية دقيقة الحبيبات كالطفل والطباشير فلها أعناق مسام صغيرة للغاية وبالتالي فهي غير منفذة، كذلك نلاحظ أن هناك كثيراً من صخور الحجر

الرملي أو الحجر الجيري غير منفذة بسبب صغر أعناق المسام بها وتسمى في هذه الحالة بالصخور الكتيمة أو المحكمة tight، وبالرغم من ذلك فتوجد صخور محكمة من الحجر الجيري كلها تحتوي على عدة ملايين من الزيت القابل للإنتاج وتصل النفاذية فيها إلى جزء من الملي دارسي (٠،٥ ملي دارسي) وذلك بسبب دقة حجم حبيباتها.



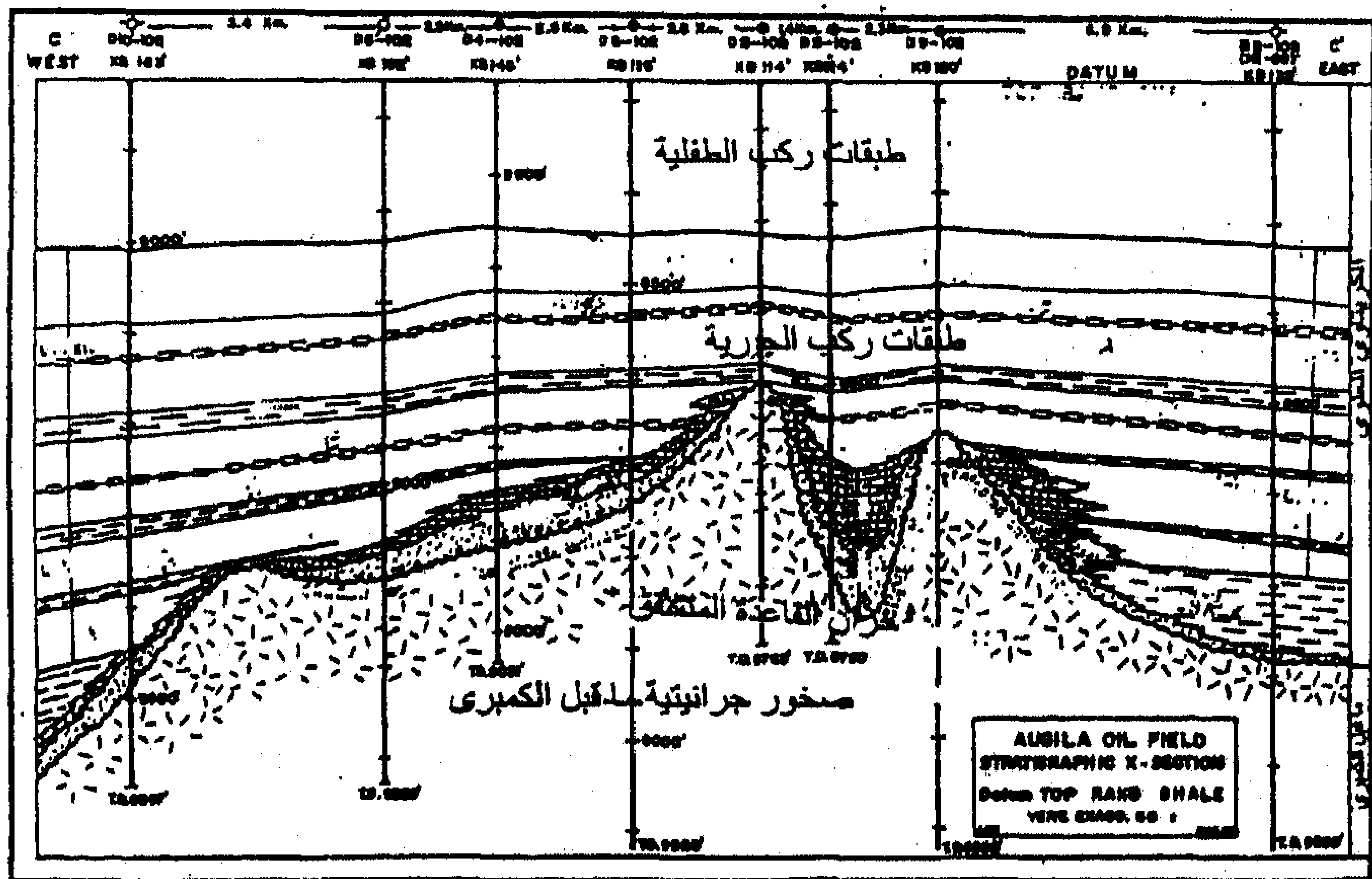
شكل ١٠-٤: العلاقة بين المسامية والنفاذية.



شكل ١٠-٥: رسم تخطيطي يوضح انسياب الموائع خلال أعناق المسام الصخرية.

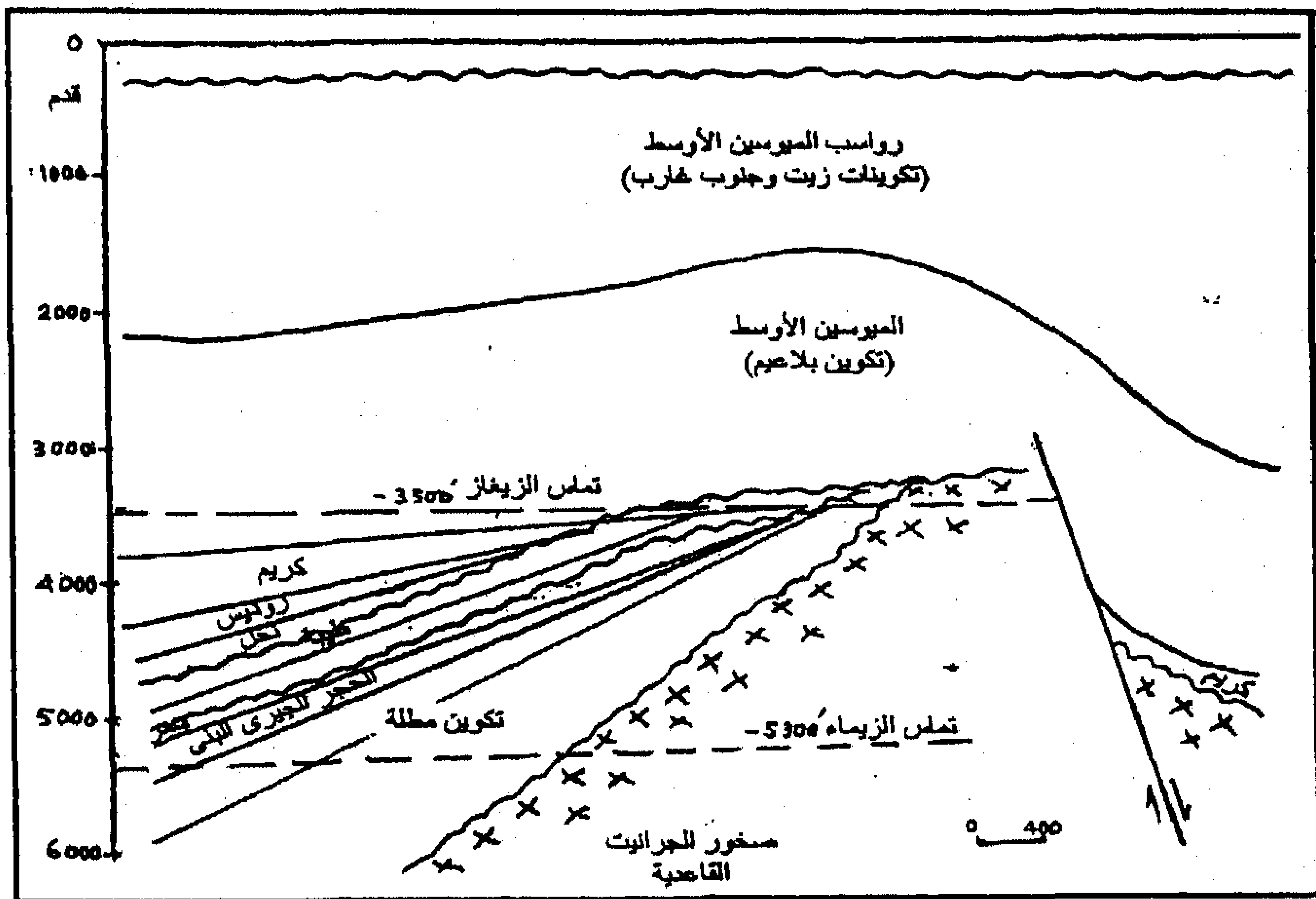
وتعمل الشقوق fractures في الصخور على زيادة النفاذية، وهناك أمثلة لصخور من الطفل والصوان والطباشير تعمل كصخور خزانية جيدة ويرجع ذلك إلى تشققها، بل إن

صخور القاعدة قد تصبح أيضاً صخوراً خزانية عندما يحدث للصخور التي تعلوها تثن ويصاحب ذلك تكسير للصخور القاعدية على طول قمة الطية، وإذا ما كانت هناك صخور مصدرية للبترول في موقع منخفض عن قمة الطية فان البترول سوف يهاجر إلى أعلى حيث صخور القاعدة التي تشققت، وعلى سبيل المثال هناك حقل ولمنجتون Wilmington بكاليفورنيا وبه تركيب جيولوجي من طية محدبة ويتم إنتاج الزيت في هذه الحقل من سبع طبقات من الحجر الرملي بالإضافة إلى الجزء العلوي من صخور القاعدة المتحولة والمشققة، كذلك هناك مثال آخر جدير بالإشارة إليه وهو حقل عجيلة Augila بحوض سرت الغني باحتياطياته البترولية (أكثر من ٢٥ بليون برميل قابلة للاستخراج) وكان هذا الحقل قد اكتشف عام ١٩٦٦ عن طريق المسح السيزمي وأعطت الاختبارات البئرية ما يربو عن ٢٠ ألف برميل في اليوم من الزيت الخام (٣٥°) من كل من الصخور الجرانيتية المجواة والمشققة وصخور الحجر الجيري (من الكريتاوي الأعلى) التي ترسبت في لاتوافق تبايني فوق المرتفع الجرانيتي القاعي (شكل ١٠-٦). وفي مصر هناك عدد من حقول البترول التي تنتج من صخور القاعدة المشققة بمنطقة خليج السويس مثل حقل جيسوم الجنوبي South Geisum (شكل ١٠-٧) حيث قدرت مسامية الشقوق ما بين. و٣٪ ووصل معدل الإنتاج اليومي إلى نحو ألف برميل من البئر GA-1.



شكل ١٠-٦: قطاع جانبي في حقل عجيلة بليبيا يوضح عدم التوافق التبايني ووجود البرك البترولية في الصخور النارية (ما قبل الكمبري) وكذا صخور الحجر الرملي التي ترتكز عليها من عصر الكريتاوي العلوي.

وهناك أيضاً حقل بوينت أرجللو Point Arguello البحري بجنوب كاليفورنيا حيث ينتج الزيت من طبقات متبادلة من الصوان chert والطفل المشققين عند عمق ما بين ١٨٠٠ و٢٤٥٠ متر تحت قاع البحر sea floor ويبلغ السمك الفعال للطبقة الخازنة نحو ٢١٠ متر، والمسامية المتوسطة ١٥٪ والنفاذية ما بين ٠.١ و٣٠٠٠ ملي دارسي بسبب التشقق والذي بدونه ما كان يمكن للتكوين الجيولوجي أن يكون منتجاً، ومن المتوقع أن يصل إنتاج الحقل إلى حوالي ٣٠٠ مليون برميل من الزيت الخام. وتجدر الإشارة إلى أن هناك عدداً ليس بقليل من هذه الخزانات الجرانيتية في مصر وخارجها وقد سبق مناقشتها، كذلك فإن صخر الطباشير يمكن أن يصبح صخراً خزانياً إذا ما تعرض للتشقق والتكسير الأمر الذي يسمح للبترول الهجرة إليه والاستقرار بالمصيدة إذا ما توافرت الصخور المصدرية بالقرب منه.



شكل ١٠-٧: قطاع عبر حقل جيسوم الجنوبي يوضح صخور القاع المتشققة.

- **التشبع بالموائع:**

يتجمع الزيت والغاز والماء داخل مسام الصخر الخزان وذلك في نسب متباينة تختلف من خزان لآخر وتعرف حصيلة هذا التجمع بالتشبع saturation الذي يصل في نهايته إلى ١٠٠٪، وإذا كان التشبع بالماء مثلا ٢٠٪ فإن تشبع الصخر بالهيدروكربون هو ٨٠٪ وهذا يفسر مصاحبة البترول المنتج من الآبار لقدر من الماء الموجود أيضاً في المسام الصخرية

وهو ماء شديد الملوحة ويعرف بالملح الأجاج oil field brine حيث تصل ملوحته ربما إلى أكثر من ٢٠٠ جم في اللتر مقارنة بملوحة الماء في البحر والتي تبلغ حوالي ٣٥ جراماً في اللتر. وتجدر الإشارة إلى أن المياه المرافقة للبرك البترولية عادة ما تكون ذات ملوحة عالية والتي اكتسبتها على مدى الأزمنة الجيولوجية الطويلة وتتكون أساساً من ملح كلوريد الصوديوم NaCl، إلا أنه في حالات غير شائعة قد تتدنى ملوحة المياه لتصل ما بين ٥ و١٠ جرام/لتر أو أكثر قليلاً وتعرف هذه المياه عندئذ بالمياه المويلحة brackish waters أي الضاربة للملوحة كما نشاهد ذلك في حوض غدامس Ghadames basin بالجزائر أو دلتا نهر النيجر ويرجع السبب في ذلك إلى النشاط الهيدروديناميكي هناك وتأثر المياه الأصلية داخل الخزانات الجوفية بتسرب المياه السطحية إليها.

ومن ناحية أخرى يسمى المائع الذي يحتل السطح الخارجي للمسام وتلامس سطح الصخر بالمائع المُبلِّل wetting fluid، وفي الحجر الرملي عادة ما يكون الزيت في مركز المسام ويتركز الماء على السطح الخارجي ملامساً لحبيبات الرمل، ولهذا السبب فإن أغلب صخور الحجر الرملي تعتبر مبللّة بالماء water wet (أي أن الماء يغطي حبات الرمل)، وعلى النقيض فإن صخور الحجر الجيري والدولوميت عادة ما تكون مبللة بالزيت oil wet (أي أن الزيت يغطي سطح الصخر)، كذلك فإن نسبة استرجاع الزيت من الخزانات التحتسطحية تكون هي الأعلى في حالة خزانات الحجر الرملي مقارنة بالخزانات الجيرية، وهذا راجع إلى أن المائع الموجود في وسط المسام سوف ينساب بشكل أسهل من المائع الموجود على السطح الخارجي للمسام الملتصق بالصخر بسبب التوتر السطحي.

طفل الزيت:

طفل الزيت oil shale هو نوع من الصخور الرسوبية الغنية بالمادة العضوية المعروفة بالكيروجين kerogen، وإذا ما تم تسخين هذا الصخر إلى ٣٥٠ درجة مئوية فإن مادة الكيروجين سوف تتحول إلى الزيت الخام الذي يسمى عندئذ زيت الطفل shale oil، ويعتبر طفل الزيت من الصخور المصدرية القديمة ولكنها لم تترسب وتدفن عند أعماق ودرجات حرارة كافية لتحويل المادة العضوية إلى الزيت، وعليه فانها تعتبر صخوراً غير ناضجة وتصاحبها عادة صخور غير عضوية مثل الصلصال والمرو الدقيق الحبيبات وكذلك الكالسيت والملح.

ويوجد طفل الزيت في أنحاء متفرقة من العالم مثل أستراليا وروسيا والبرازيل والولايات المتحدة والأردن. وطفل الزيت من الرتبة العليا قد ينتج أكثر من ٢٥ برميلاً من الزيت لكل طن من الطفل وقد يصل المخزون منه أحياناً إلى أكثر من ٦٠٠ بليون برميل ويمكن أن يتم تعدينه بالطرق السطحية أو بالتسخين الاصطناعي لفصل الزيت منه، وبسبب تكلفة الإنتاج العالية فإن هذا لا يجعل من تنمية هذا الطفل وإنتاج الزيت الخام منه أمراً جذاباً.

رمال القطران:

تحتوي هذه الرمال tar sands على زيت ثقيل للغاية وغير مختلط بحباتها، ونظراً للزوجة العالية لهذا الزيت فإنه يصعب إنتاجه بالطرق المعتادة، كما توجد رواسب ضخمة من هذه الرمال القطرانية في كندا وفنزويلا وترينداد، ويعتقد أنها نشأت في الأصل من زيت ذي جودة جيدة ثم تدهورت حالته فيما بعد بسبب تعرضه للجو وتأثره بالأحداث الجيولوجية المختلفة، وقد عثر على مخزونات هائلة من هذه الرمال تقدر بنحو ٨٠٠ بليون برميل من الزيت في ألبرتا بكندا، كما أن بعضها موجود على أسطح اللاتوافق، ويجري تعدين هذه الرمال القطرانية بصورة اقتصادية في بعض المناطق.

الفصل الحادي عشر

طبيعة الزيت والغاز والمتكثفات

تعريف الهيدروكربونات:

أشرنا في السابق إلى أن الزيت الخام والغاز الطبيعي ينتميان إلى مجموعة الهيدروكربونات وهي مواد عضوية تتكون أساساً من عنصر الكربون والهيدروجين بالإضافة إلى عناصر أخرى توجد بكميات ضئيلة كالكبريت والنيتروجين والأكسجين كما هو مبين في الجدول ١١-١، إلا أن للبعض منها تأثيراً ملحوظاً على جودة الإنتاج بما لها في كثير من الحالات من مفعول مؤذ أو ضار يوجب إزالتها أو تحويلها عبر عمليات التكرير إلى مركبات أقل ضرراً.

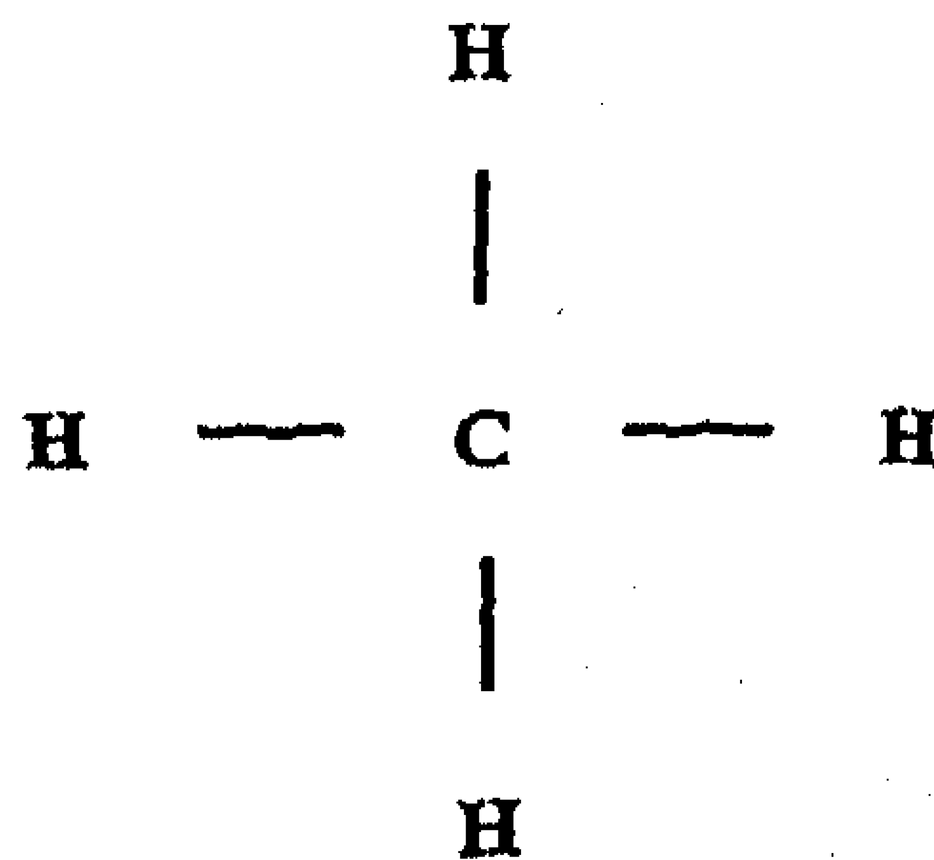
جدول ١١-١: نسب العناصر في الزيت الخام والغاز الطبيعي.

العنصر	الزيت الخام (٪)	الغاز الطبيعي (٪)
الكربون	٨٤-٨٧	٦٥-٨٠
الهيدروجين	١١-١٤	١-٢٥
الكبريت	٠,٠٦-٢	٠-٠,٢
النيتروجين	٠,١-٢	١-١٥
الأكسجين	٠,١-٢	٠

وقد تكون الهيدروكربونات في الأحوال العادية من الضغط والحرارة على شكل غاز أو سائل أو مادة صلبة، فذلك متوقف على عدد ذرات الكربون وشكل توزيعها في الجزيئات، فالهيدروكربونات المتشكلة جزيئاتها من أربع ذرات كربون أو أقل تكون على شكل غاز، أما التي تحتوى على أكثر من عشرين ذرة كربون فهي صلبة، وما بين هذين الحدين فهي هيدروكربونات سائلة وقد تحتوى أنواع المزيج السائل ومنها معظم الزيوت الخام على مركبات غازية أو صلبة أو الاثنتين معاً مذابة فيها. فالزيت الخام منْ حقل شونبيك في هولندا مثلاً يحتوي على نسبة مرتفعة من الهيدرُوكروبونات الصلبة الذائبة فيه،

ويكون هذا الزيت سائلاً إذ يتدفق من البئر على درجة حرارة ٧٠ مئوية، إلا أنه يكاد يتصلب حين يبرد نظراً لتبلور المركبات الصلبة فيه، وعلى غير ذلك هناك عدد كبير من الزيوت الخام تحتوى على نسبة ضئيلة من الهيدروكربونات الصلبة ولذلك تظل سائلة حتى عند درجة حرارة منخفضة.

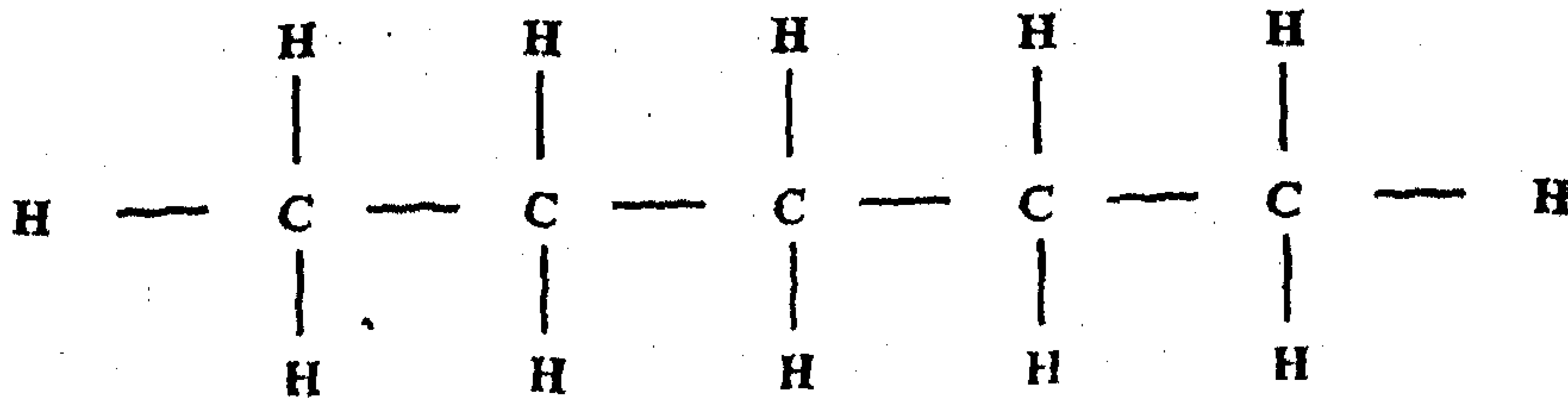
وأبسط الهيدروكربونات الميثان methane وهو غاز يتشكل من ذرة كربون واحدة وأربع ذرات هيدروجين ويمثل جزيء الميثان CH_4 على النحو التالي:



ولذرة الكربون رباطات bonds تمكنها من أن تتحد مع ذرة واحدة أو أكثر من ذرات كربون أخرى (وهذه ميزة ينفرد الكربون بها) أو مع ذرات عناصر أخرى، أما ذرة الهيدروجين فليس لها سوى رباط واحد فلا يمكنها بالتالي أن تتحد مع أكثر من ذرة واحدة.

طبيعة الزيت الخام ومجموعة الهيدروكربونات:

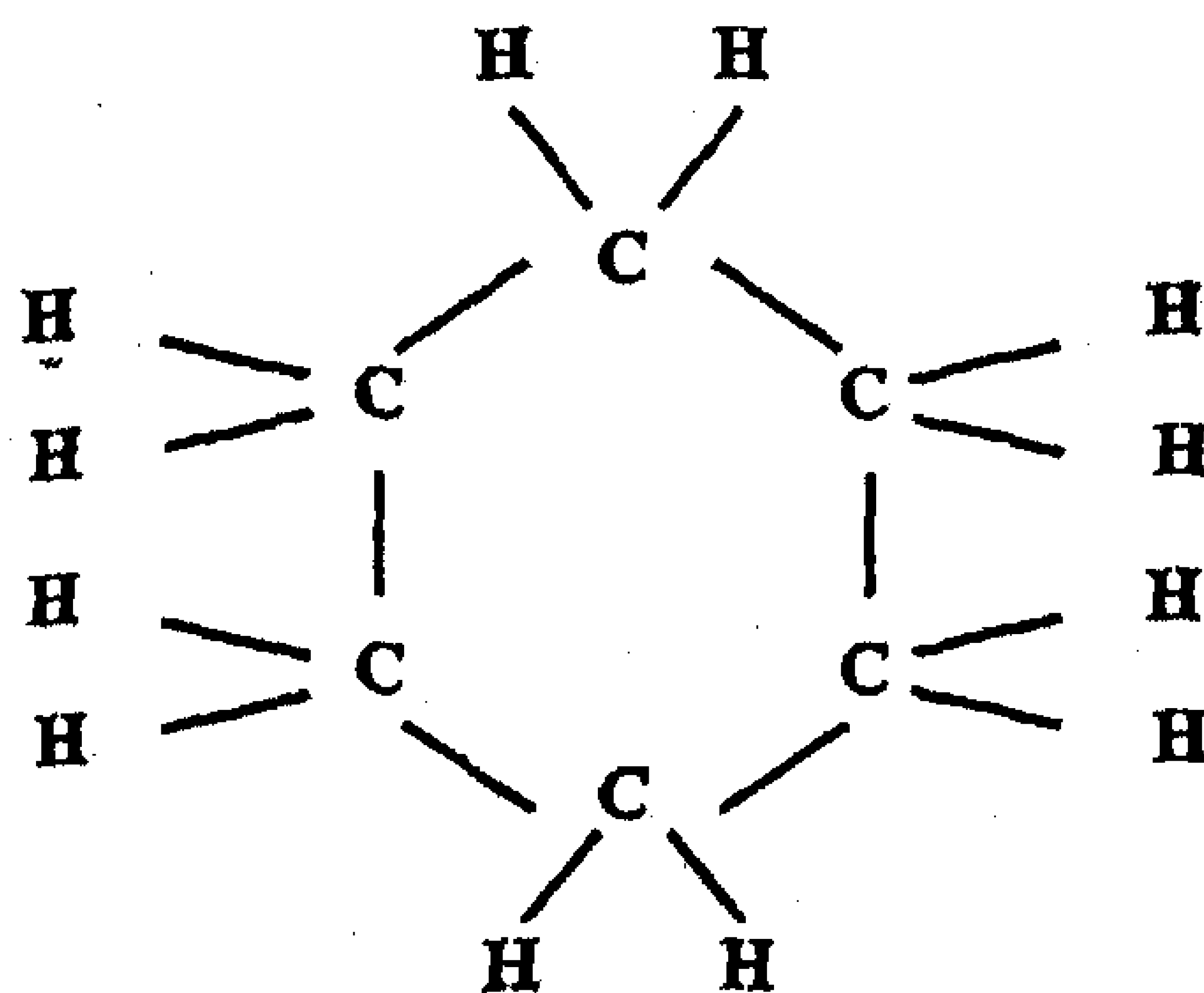
الزيت الخام هو مزيج من أكثر من مائة جزيء من جزئيات الهيدروكربونات والتي تتراوح في الحجم من ٥ أو أكثر من ٦٠ ذرة كربون مترابطة في سلسلة مستقيمة أو سلسلة ذات فروع أو في حلقة، وذلك على النحو التالي:



وفي الزيوت الخام هناك أربع أنواع من الجزيئات الهيدروكربونية تسمى بالسلسلة أو المجموعة الهيدروكربونية hydrocarbon series وتختلف نسب هذه السلاسل من زيت إلى آخر وتتحكم في الخواص الكيميائية والفيزيائية للزيت الخام، وتتشكل السلاسل من مجموعات الجزيئات البارفينية والنفثينية والعطرية، وتعرف الهيدروكربونات التي تحتوى على ترابط أحادي بين ذرات الكربون بالهيدروكربونات المشبعة saturated، أما تلك التي تحتوى على ترابطات ثنائية أو أكثر فتعرف بالهيدروكربونات غير المشبعة undersaturated.

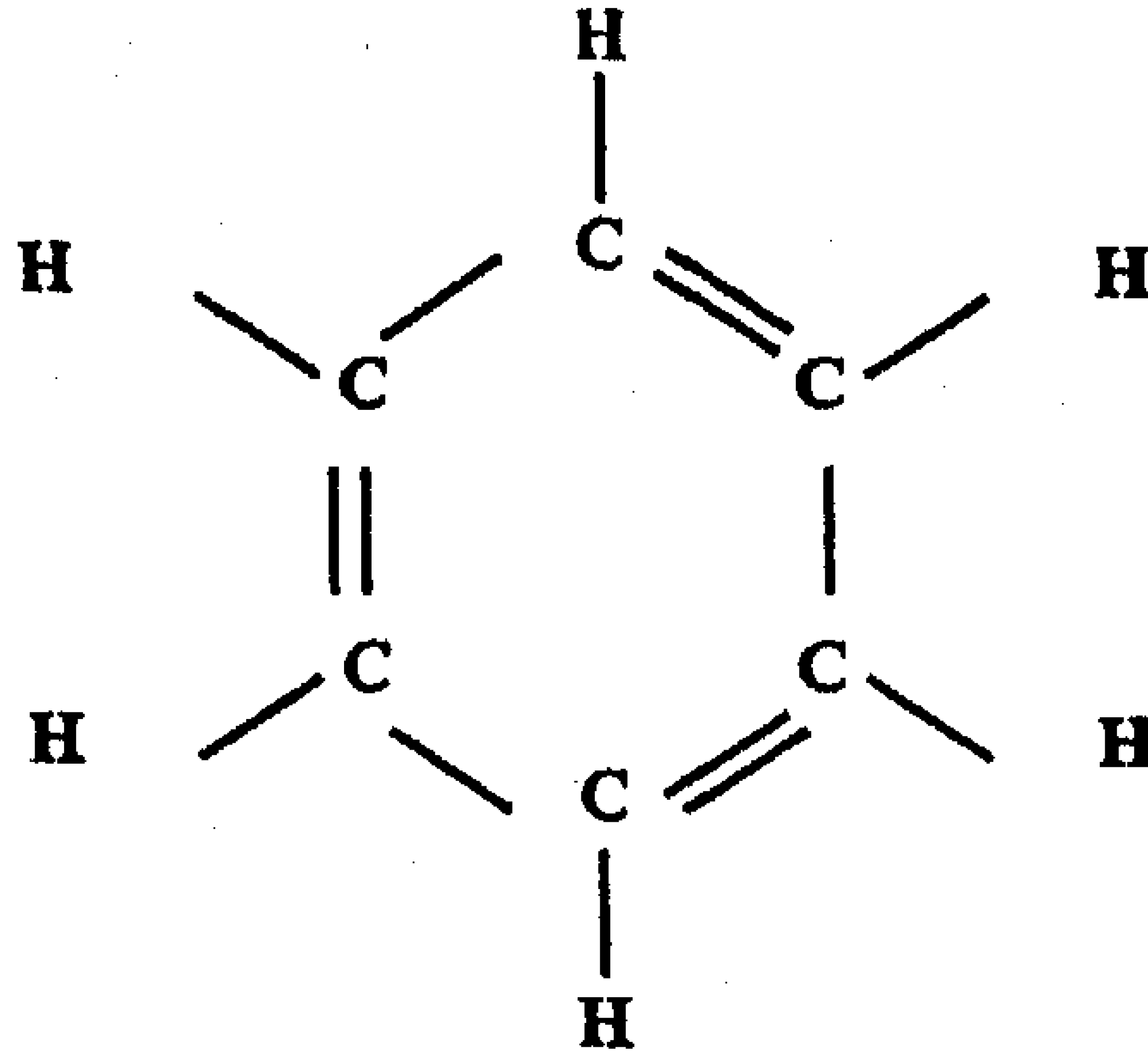
ويتشكل جزيء البارافينات paraffin molecule من سلسلة مستقيمة straight chain وترابط متشبع بين ذرات الكربون ومعادلة كيميائية عامة C_nH_{2n+2} وإذا ما احتوى الجزيء على أكثر من ١٨ ذرة كربون فيتكون الشمع ويعرف الزيت الخام حينئذ بالزيت الخام الشمعي waxy crude oil.

وأما جزيء النفثينات naphthene molecule فهو هيدروكربون يتشكل من تركيب حلقي ذي ترابطات مشبعة بين ذرات من الكربون وذي معادلة عامة C_nH_{2n+2} وتتشكل من خمس ذرات من الكربون أو أكثر كما هو مبين بالشكل الآتي:



والزيوت الخام التي تحتوى على نسبة عالية من النفثينات عادة ما تتضمن نسبة عالية من الأسفلت مما يقلل من قيمتها الاقتصادية.

وأما جزيء العطريات aromatic molecule فيتشكل من مركبات حلقية ذي ترابطات غير مشبعة بين ذرات الكربون ومعادلة كيميائية عامة C_nH_{2n-6} وتحتوى على ٦ أو أكثر من ذرات الكربون على النحو الآتي:



وتتشكل كل هذه المجموعة من مركبات حلقية rings يحتوي الواحد منها على حلقة سداسية أو أكثر تحتوى بدورها على ثلاثة ترابطات مزدوجة ومتناوبة، وأبسط هذه المركبات العطرية البنزين C_6H_6 الذي تحمل كل ذرة كربون به ذرة واحدة من الهيدروجين، وفي معامل التكرير يعطي الزيت الخام الغني بالمركبات العطرية إنتاجاً وفيراً من البنزين gasoline العالي الأوكتان مما يجعله مادة بتروكيمائية ذات قيمة اقتصادية كبيرة.

وجدير بالذكر أن الزيت الخام المنتج حديثاً من الحقول تغلب عليه رائحة البنزين، أما الزيت الخام الغني بالمركبات العطرية فله رائحة تشبه كثيراً نكهة الفاكهة.

وأما جزيء الأسفلتيات asphaltic molecule: فيتشكل من ٤٠ إلى أكثر من ٦٠ ذرة كربون، والأسفلت هو صورة من التواجدات البترولية ويتميز بلونه البني أو الأسود في حالته شبه الصلبة والصلبة وله نقطة غليان مرتفعة.

ويوضح الجدول ١١-٢ النسب المختلفة لمجموعات الهدروكربونات في الزيت الخام.

جدول ١١-٢: التواجد النسبي للمجموعات الهيدروكربونية

المجموعة الهيدروكربونية	النسبة (بالوزن) ٪	التواجد النسبي ٪
بارافينات	٣٠	١٥-٦٠
نفثينات	٤٩	٣٠-٦٠
عطريات	١٥	٣-٣٠.
أسفلتيات	٦	الباقي

جودة الخام:

يتباين الزيت الخام في درجة جودته وكثافته، فقد تختلف هذه الجودة من خزان لآخر ومن حقل لآخر ومن منطقة لأخرى، ولقياس كثافة الخام ونوعيته هناك مقياس شائع الإستخدام قدمه معهد البترول الأمريكي ويعرف بـ (API°) وهو مرتبط أساسا بكثافة الزيت الخام على النحو التالي:

$$API^{\circ} = [\ (141.5/\text{specific gravity at } 60^{\circ}\ F\ ) - 131.5\ ]$$

فالماء العذب على سبيل المثال درجة جودته حسب هذا المقياس ١٠ درجات، أما الزيت الخام فتتراوح جودته ما بين ٥ و٥٥ والزيت الخام الخفيف ما بين ٣٥ و٤٥ وهذا النوع من الخام عادة ما يكون على حالة عالية من السيولة وشفاف وغني بالجازولين وهو أفضل الخامات على وجه الإطلاق، أما الزيوت الخام الثقيلة فتصل جودتها إلى ما دون ٢٥ وهي زيوت عالية اللزوجة داكنة اللون وتحتوي عادة على نسبة عالية من الأسفلت وأقل كثيرا من الأنواع الخفيفة من حيث قيمتها الاقتصادية.

محتوى الكبريت:

يعتبر الكبريت من الشوائب غير المرغوب وجودها في الوقود الأحفوري fossil fuels مثل الزيت الخام والغاز الطبيعي والفحم، وعندما يحرق الكبريت يتولد غاز ثاني أكسيد الكبريت sulphur dioxide الذي يعمل على تلويث الهواء وتزايد نسبة الأحماض في الأمطار مما يكون له تأثير بيئي سيء، وفي معامل التكرير لابد من إزالة الكبريت أثناء معالجة الزيت الخام وإلا تسبب وجود الكبريت في إحداث أضرار بمكونات تلك المعامل.

وتقسم الزيوت الخام إلى نوع حلو sweet وآخر حامضي sour وذلك بناء على نسبة وجود الكبريت sulphur content بالخام، والخام الذي يحتوي على نسبة من الكبريت أقل من ١ ٪ بالوزن يطلق عليه الزيت الحلو، والخام الذي به نسبة أعلى من ١٪ يسمى الخام الحامضي، وأغلب الزيوت الثقيلة هي من النوع الحامضي، أما الزيوت الخفيفة فهي من النوع الحلو، وفي معامل التكرير يسمى الزيت بالخام المنخفض الكبريت إذا كانت نسبة الكبريت به ما بين ٠.٥ و٠.٦ ٪ أما إذا تراوحت نسبة الكبريت في الخام ما بين ٠.٦ و١.٧ ٪ فهو من النوع المتوسط وإذا زادت النسبة عن ذلك فهو خام عالي الكبريت، وفي

الزيت الخام يكون أغلب الكبريت مترابطا مع ذرات الكربون باستثناء نسبة ضئيلة منه مذابة في الخام السائل على هيئة غاز كبريتيد الهيدروجين (H_2S).

الزيت الخام القياسي:

زيت البترول القياسي standard هو خام استرشادي benchmark crude oil يتمتع بمواصفات معينة من حيث درجة الجودة والسعر، ويسترشد به في تحديد أسعار الزيوت الخام الأخرى، ففي الولايات المتحدة الأمريكية مثلا هناك خام غرب تكساس المتوسط West Texas Intermediate (WTI) الذي يتميز بدرجة جودة عالية ما بين 38 و 40°API ونسبة كبريت لا تتجاوز ٠،٠٣٪، وخام غرب تكساس الحامضي الذي تبلغ جودته ٣٣ ويحتوى على نسبة أعلى من الكبريت (١،٠٦٪) كذلك هناك خام برنت Brent وهو الخام القياسي في منطقة بحر الشمال يشبه كثيراً خام غرب تكساس المتوسط وتبلغ جودته ٣٨ ونسبة الكبريت به ٠،٠٣٪، أما خام دبي Dubai فهو الخام القياسي لمنطقة الشرق الأوسط وهو ذو جودة ٣١ ونسبة كبريت ٢٪، وإضافة إلى ذلك هناك خامات قياسية أخرى منها خام خليج السويس وغيرها، والتي تتمتع بدورها بمواصفات معينة لمضاهاة الخامات الأخرى بها وتحديد جودتها وأسعارها في الأسواق الدولية.

نقطة الانصباب:

تحتوى الزيوت الخام في أغلبها على جزيئات بارافينية وإذا اشتملت هذه الجزيئات على ثماني (٨) ذرات كربون أو أكثر فتسمى بالشموع waxes، وهذه الأخيرة تكون في حالة صلبة عند درجة الحرارة العادية، ويقال للزيت الخام الذي يحتوي على كميات كبيرة من الشمع إنه زيت شمعي waxy crude oil، وفي صخور الخزانات الجوفية حيث ترتفع درجة الحرارة يكون الزيت الشمعي في حالة سائلة لكنه عندما يصل إلى السطح فإنه يبرد ويتصلب إلى شمع، وقد يؤدي ذلك إلى انسداد أنبوب الإنتاج وخطوط التدفق السطحية الأمر الذي يتطلب غلق البئر المنتجة وتنظيفها وإزالة ما بها من شمع عالق، وفي حقول البترول يمكن التعرف على كمية الشمع التي يحتويها الزيت الخام عن طريق ما يسمى بنقطة الانصباب أو الانسكاب pour point للزيت، ويجري تعيين هذه النقطة عملياً بأخذ عينة من الزيت المنتج وتسخينها ثم صبها بعد ذلك في

وعاء وهي في حالتها الساخنة إلى أن تصبح باردة، وعند درجة الحرارة التي يتوقف الزيت فيها عن الانسكاب تكون هي نقطة الانصباب، وتختلف قيمة هذه النقطة تبعاً لنوع الزيت وقد تصل ما بين ٥٢ و٦٠ درجة مئوية (75-125°F)، وكلما ازدادت القيمة فإن هذا يعكس مقدار المحتوى الشمعي بالخام. وبالإضافة إلى نقطة الانصباب هناك نقطة أخرى تعرف بنقطة التغيم cloud point وهي درجة الحرارة التي عندها يبدأ ظهور تغيم لعينة الزيت ويلي ذلك تصلب الشمع وهي أعلى من نقطة الانصباب بدرجة إلى ثلاث درجات مئوية. وعادة ما تكون الزيوت الغنية بالشمع ذات لون أصفر، وأما الزيوت التي لا تحتوى إلا على كميات قليلة من الشمع فيميل لونها إلى الأخضرار، وأما تلك التي لا تحتوى أو تحتوى على كميات ضئيلة للغاية من الشمع فيكون لونها داكناً أو ضارباً للسواد، وعلى سبيل المثال نقطة الانصباب في خام برنت 3 درجة مئوية أي (27°F) بينما هي ترتفع في حقل اسثاتفيورد Statfjord بذات المنطقة إلى 4.5°C (+40°F) بسبب المحتوى الشمعي المرتفع.

خواص أخرى للزيت الخام:

يمكن للون الزيت الخام أن يكون أحد المواصفات المميزة له وهو يتباين من عديم اللون إلى الأصفر المخضر إلى المائل للحمرة إلى البني إلى الأسود، وكلما كان لون الخام غامقاً قلت درجة جودته في العادة.

كذلك فإن رائحة الخام تتنوع من رائحة البنزين (الزيت الحلو) إلى الكريهة (الخام الحامضي) إلى نكهة الفاكهة (الخام العطري)، وبالنسبة للقيمة الحرارية للزيت الخام فهي تتراوح ما بين ١٨٣٠٠ - ١٩٥٠٠ وحدة حرارية بريطانية.

والجدول ١١-٣ يبين وصفاً مختصراً لعدد من الزيوت الخام في بعض البلدان المنتجة للبترول:

جدول ١١ -٣: مواصفات الزيوت الخام في بعض البلدان.

الخام	البلد	الجودة (API)	الكبريت (٪)	نقطة الانصباب
براس ريفر Brass River	نيجيريا	٤٣	٠،٠٨	-٥
بوني الخفيف Bonny light	نيجيريا	٣٧،٦	٠،١٣	+٣٦
إيكوفسك Ekofisk	النرويج	٣٥،٨	٠،١٨	+١٥
الإيراني الخفيف Iranian light	إيران	٣٣،٥	١،٤	-٢٠
العربي الخفيف Arabian light	السعودية	٣٣،٤	١،٨	-٣٠
دبي Dubai	الإمارات	٣٢،٥	١،٦٨	-٥
الكويت Kuwait	الكويت	٣١،٢	٢،٥٠	٠
نورث سلوْب North Slope	الولايات المتحدة	٢٦،٨	١،٠٤	-٥
باشكويرو Bachequero	فنزويلا	١٦،٨	٢،٤٠	-١٠

وحدات قياس الخام:

البرميل barrel هو وحدة القياس حسب النظام الإنجليزي ويعادل ٤٢ جالوناً أمريكياً U.S. gallon أو ٣٧،٩٧ جالوناً إمبراطورياً Imperial gallon، ويقاس معدل الإنتاج اليومي من الزيت بالبرميل في اليوم (برميل/ يوم)، أما الوحدات المترية فهي الطن متري أو المتر المكعب، ويعادل الطن المتري للخام الثقيل (20°API) ٦،٧٥ برميل، وأما الطن المتري للخام الخفيف(40°API) فهو يساوي ٧،٦٤ برميل، وأما المتر المكعب ($م^٣$) فهو يعادل ٦،٢٩ برميل من الزيت.

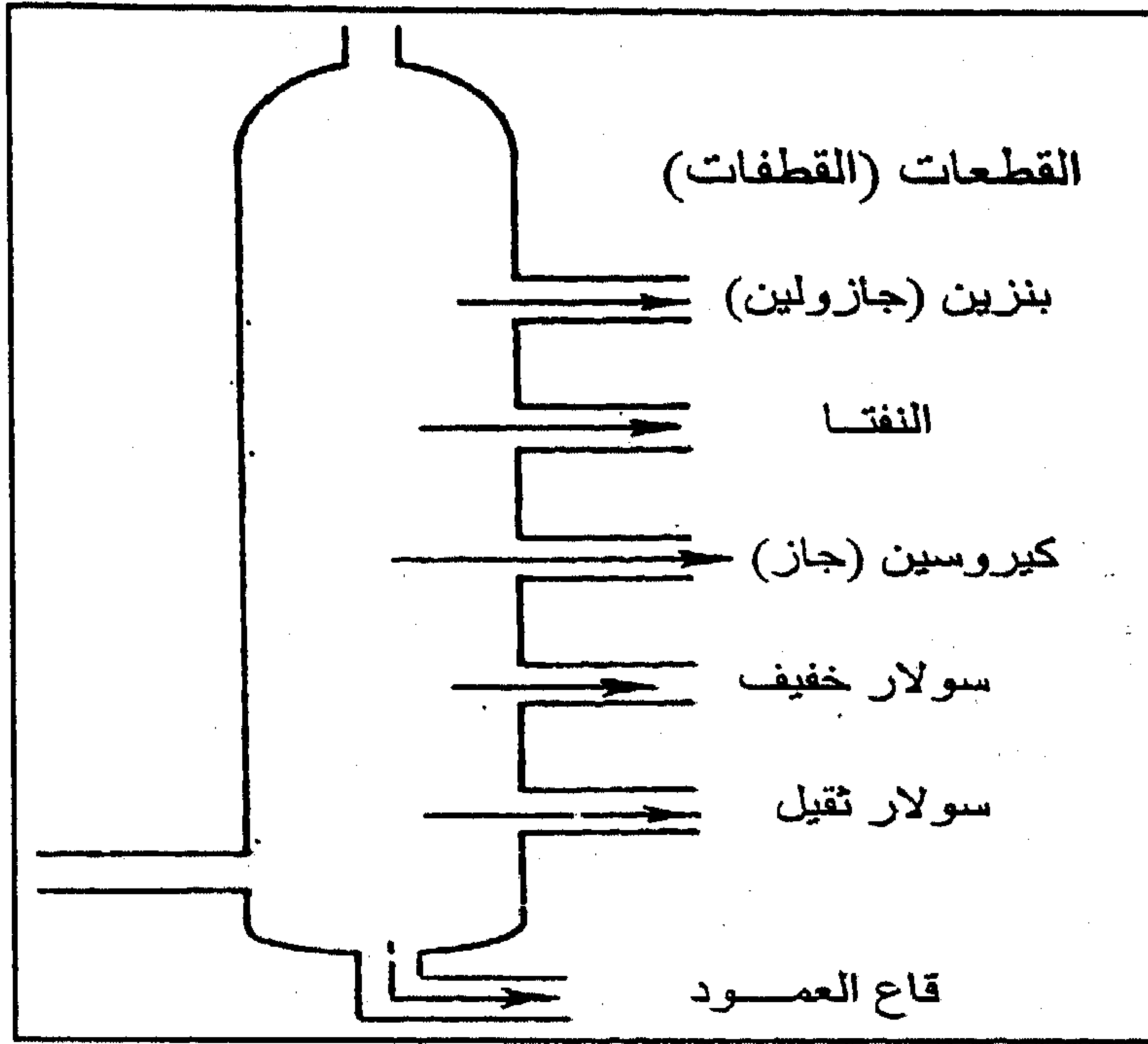
تكرير الزيت الخام:

يجري للزيت الخام المنتج عملية تقطير لمكوناته تسمى التقطير التجزيئي fractionational distillation ويتم ذلك في معامل التكرير المختلفة، وأثناء عملية تكرير الخام refining يتم فصل المكونات الداخلة في تركيبه وذلك تبعاً لدرجات غليان هذه

المكونات، وفي البداية يجري تسخين الزيت المراد تقطيره حتى يتحول إلى بخار ثم يدفع هذا البخار إلى عمود التجزئة وهو أسطوانة فولاذية عمودية تقطعها ألواح (صوان) أفقية إلى عدد من المقاطع (شكل ١١-١) وتتصاعد الأبخرة في هذا العمود وتتساقط السوائل إلى أسفل حيث تتكثف الأبخرة على تلك الصواني ويتم إزالة السوائل المكثفة عن طريق مخارج جانبية، وتحوي الصواني عدداً كبيراً من الثقوب يتصاعد منها إلى أعلى البخار القادم من الصواني السفلى، وهكذا تحدث عملية تكثف وإعادة البخر في كل صينية ويكون ترتيب السوائل المنفصلة تبعاً لشدة درجة الحرارة وهي على الترتيب: زيت الغاز (السولار) الثقيل، زيت الغاز (السولار) الخفيف، الكيروسين، النفثا، ثم الجازولين (البنزين)، ويعتبر الجازولين هو المنتج الأكثر إقبالا على الطلب في أغلب الأحوال، وهو يتركب من جزيئات ذات سلسلة قصيرة (٥ إلى ١٠ ذرات كربون) كما يمكن الحصول عليه أيضاً من المقطرات الأخرى ذات السلسلة الأطول وذلك عن طريق عملية التكسير cracking process حيث تدخل هذه المقطرات أبراجاً خاصة تعرف بأبراج التكسير cracking towers وتتعرض إلى درجات حرارة عالية وضغوط كما تضاف مواد كيميائية كاوية بهدف شطر هذه السلسلة الطويلة والحصول على جزيئات الجازولين.

وتجدر الإشارة إلى أنه يمكن أيضا الحصول على منتجات كيميائية خالصة من الزيت الخام ومن هذه المنتجات غاز الميثان والإثيلين والبروبيلين والبيوتيلين والنافثين والتي تحتاجها الصناعات البتروكيماوية حيث يعاد تشكيل جزيئات واستخلاص منتجات أخرى مثل البلاستيك والمنظفات والألياف الاصطناعية والأسمدة والتفلون والعقاقير والصبغات والمفرقعات والمطاط وغيرها.

ويوضح الجدول ١١-٤ عدداً من المواد المستخلصة من تقطير الزيت الخام ويلاحظ أن الجازولين هو المقطر الرئيس في العملية يليه زيت الوقود (المازوت) فوقود الطائرات النفاثة ويأتي الكيروسين كأقل منتج بين هذه المقطرات حسب بيانات معهد البترول الأمريكي.



شكل ١١-١: رسم تخطيطي لعمود التجزئة.

جدول ١١-٤: المواد المستخلصة من تقطير الزيت الخام ونسبتها المئوية.

المنتج	النسبة المئوية (٪)
جازولين (بنزين)	٤٦
زيت الوقود (مازوت)	٢٧
وقود الطائرات	١٠
كوك	٥
غازات مسيلة	٤
خامات بتروكيميائية	٣
أسفلت	٣
شحوم	١
كيروسين	١

الغاز الطبيعي ومكوناته:

يتكون الغاز الطبيعي من جزيئات هيدروكربونية تتراوح من حيث طولها بين ذرة إلى أربع ذرات من الكربون، ويسمى الغاز الذي يحتوي على ذرة كربون واحدة (CH_4) الميثان وعلى ذرتي كربون الإيثان ethane (C_2H_6) وعلى ثلاث ذرات كربون(C_3H_8) البروبان propane وعلى أربع ذرات كربون (C_4H_{10}) البوتان butane وجميع الغازات من الجزيئات الهيدروكربونية البارافينية، والجدول الآتي يمثل تركيبا نموذجياً للغاز الطبيعي والنسب السائدة به:

المكون الغازي	النسبة المئوية (٪)
ميثان methane (CH_4)	٧٠ - ٩٨
إيثان ethane (C_2H_6)	١ - ١٠
بروبان propane (C_3H_8)	اثار - ٥
بوتان butane (C_4H_{10})	اثار - ٢

وتتباين النسب المذكورة من حقل لآخر ولكن يكون الميثان في جميع الأحوال هو الغاز السائد، وهناك العديد من الحقول التي تحتوى كلية على الميثان دون غيره من الغازات، كما أن غاز البروبان والبوتان يستخدمان كوقود بعد فصلهما من الغاز الأصلي نظراً لما يعطيانه من حرارة أعلى من تلك الناتجة عن حرق الميثان، ومن هذين الغازين ينتج غاز البترول المسيل liquefied petroleum gas (LPG)، ومن ناحية أخرى يحتوي الغاز الطبيعي على نسبة ضئيلة من غازات غير هيدروكربونية مثل بخار الماء وثاني أكسيد الكربون والنيتروجين والهيليوم وجميعها غازات خاملة inert لا تحترق مع الغاز الطبيعي، وكلما زادت نسبة هذه الشوائب تدنت قيمة الغاز الطبيعي، هذا وقد تصل نسبة ثاني اكسيد الكربون (CO_2) في بعض الأحيان إلى حوالي ٩٩٪ من إجمالي الغاز المنتج، ويرجح أن يكون السبب في ذلك هو تفاعلات كيميائية حدثت مع صخور الحجر الجيري عند درجات حرارة مرتفعة ونتج عنها هذا الغاز، وفي الوقت الحالي يستفاد من ثاني أكسيد الكربون في مشروعات الاستخلاص المعزز وذلك بحقن الغاز مرة أخرى في آبار الحقول التي أوشكت على النضوب، وفي تطبيق مماثل يمكن كذلك استخدام غاز النيتروجين إذا تعاظمت نسبته في الغاز الطبيعي المنتج، وسوف يأتي الحديث عن ذلك في الفصل السابع والعشرين.

وعلى الجانب الآخر يشكل كبريتيد الهيدروجين (H_2S) وهو غاز غير خامل تخوفات وهموماً بيئية للعاملين بالحقول ومصافي التكرير بسبب سُمِّيته toxicity العالية حتى في حالة وجوده بكميات ضئيلة، ويعرف هذا الغاز برائحته الكريهة التي تشبه رائحة البيض الفاسد، كما أنه عنصر يساعد على التآكل والتحات فعندما يوجد مختلطاً بالغاز الطبيعي يتسبب في تآكل أنابيب الإنتاج والتجهيزات وصمامات الآبار، وعليه لابد من فصله وإزالته من الغاز المنتج قبل ضخه إلى خطوط الإنتاج، ويعرف الغاز الطبيعي المحتوي على نسبة ضئيلة من كبريتيد الهيدروجين بالغاز الحامضيsour natural gas.

تواجد الغاز الطبيعي:

بسبب الضغط العالي في الخزان الجوفي فإن جزءاً كبيراً من الغاز الطبيعي يكون مذابا في الزيت الخام وتعرف نسبة الغاز المذاب إلى الزيت solution gas/oil ratio بأنها كمية الغاز المذاب داخل الخزان الجوفي بالقدم المكعبة في البرميل الواحد من الزيت تحت الظروف التحتسطحية السائدة، وكلما ازداد ضغط الخزان تعاظمت كمية الغاز المذاب في الزيت، وعندما يسحب الزيت من البئر المنتجة ينخفض الضغط ويتحرر الغاز من الزيت، وبنسبة متفاوتة تعرف بنسبة الغاز المنتج إلى الزيت producing gas / oil ratio (GOR) وتقدر بكمية الغاز المتحررة من الزيت مقاسة بالقدم المكعبة في البرميل الواحد من الزيت.

وبالطبع فإن الغاز قد لا يكون مصاحباً للزيت non associated وعادة ما يكون في هذه الحالة محتوياً على غاز الميثان، أما إذا كان الغاز مصاحباً للزيت associated فقد يتواجد على هيئة غاز طليق في أعلى المصيدة البترولية أو مذاباً في الزيت الخام كما سبق الذكر ويكون هذا الغاز محتويا في العادة على هيدروكربونات أخرى بجانب غاز الميثان المكون الأساسي له.

المتكثفات:

في بعض الخزانات التحتسطحية والحاملة للغاز وحيث تكون درجات الحرارة مرتفعة يوجد عدد من الهيدروكربونات السائلة، خاصة تلك التي تتركب من سلسلة قصيرة نسبياً (من ٥ إلى ٧ ذرات من الكربون)، على هيئة غاز، وعندما يبدأ إنتاج هذا الغاز تنخفض درجة الحرارة وتتكثف السوائل الهيدروكربونية من الغاز المنتج وتعرف هذه السوائل بالمتكثفات condensate والتي تتكون في أساسها من الجازولين، وتتميز

المتكثفات بلون ضارب إلى الصفرة أو الزرقة وهي عالية الجودة وتتراوح درجتها بين ٤٥ و٦٢ بمقياس الـ API كما يطلق عليها البعض الغاز الأبيض أو الجازولين الطبيعي، وفي بعض الأحيان تضاف إلى الزيت الخام بهدف تحسين جودته وزيادة كميته.

وتعتبر المتكثفات نوعاً من الزيت الخام ولكنها لا تحتوي على أوكتان عالي الدرجة ويلزم بالتالي مزجها بجازولين عال ناتج من عمليات التكسير، ولهذا السبب فإن سعر المتكثفات يكون أقل نسبياً من الزيت الخام، ويسمى الغاز الطبيعي الذي يحتوي على قدر من المتكثفات الغاز الرطب wet gas، أما الغاز الخالي من المتكثفات فيعرف بالغاز الجاف dry gas، هذا وتسمى المتكثفات ومعها البوتان والبروبان والإيثان المستخلص من الغاز الطبيعي بسوائل الغاز الطبيعي (NGL) natural gas liquids.

وحدات قياس الغاز الطبيعي:

القدم المكعبة هي وحدة القياس الحجمي للغاز الطبيعي حسب النظام الإنجليزي، ونظراً لأن الغاز يتمدد وينكمش تبعاً لتغير الضغط ودرجة الحرارة فقد استلزم القياس أن يكون تحت ظروف قياسية من الضغط ودرجة الحرارة، وقد اتفق أن يكون ذلك عند ضغط ١٤،٦٥ رطل على البوصة المربعة (psi) ودرجة حرارة 60°F وهو ما يعادل 15°C و١٠١،٣٢٥ كيلو باسكال (kPa) وهو ما يعرف بالقدم المكعبة القياسية (scf)، وإذا ما جاءت في شكل مختصر مثل (Mcf) فهذا يعني ١٠٠٠ قدم مكعبة قياسية و(MMcf) يعني مليون قدم مكعبة قياسية و(Bcf) بليون قدم مكعبة قياسية، و(Tcf) تريليون قدم مكعبة قياسية، ومن ناحية أخرى يقاس محتوى المتكثفات بالبراميل لكل مليون قدم مكعبة من الغاز (BCPMM)، كما يقاس الغاز الطبيعي بما يقدمه من محتوى حراري عند احتراقه، والوحدة الحرارية البريطانية تقدر بكمية الحرارة التي يطلقها عود ثقاب عند حرقه، وفي الغاز الطبيعي تتراوح هذه الوحدة ما بين ٩٠٠ و١٢٠٠ وحدة حرارية بريطانية لكل قدم مكعبة وتبلغ في المتوسط ١٠٠٠ وحدة، ويتوقف ذلك على التركيب الهيدروكربوني وكذا وجود الغازات الخاملة في الغاز المنتج، ويتم بيع الغاز إما بالحجم بآلاف الأقدام المكعبة (Mcf) أو بكمية الحرارة (Btu) عند حرقه أو بالاثنين معاً حسب الاتفاق، وفي النظام الدولي (SI) يقاس حجم الغاز بالمتر المكعب (m^3) والذي يساوي ٣٥،٣١٥ قدم مكعبة (cf)، وتقاس الحرارة بالكيلوجول kilojoule وهذا يساوي وحدة حرارية بريطانية (Btu) British thermal unit، ويحتوي برميل الزيت الخام في المتوسط

على ما يقرب من ٦٠٤٠ قدم مكعبة من الغاز الطبيعي ويطلق عليه في هذه الحالة برميل زيت مكافئ barrel of equivalent oil (BOE)، وهذا الرقم يختلف بعض الشيء حسب الشركات العاملة معتمداً في ذلك على طبيعة الزيت والغاز المنتجين، فمثلاً إذا كان إنتاج حقل ما هو ٥٠٠ مليون قدم مكعبة من الغاز فإنه يحتوي على ما يقرب من ٨٢٧٨ برميل مكافئ من الزيت وربما كان أكثر أو أقل من ذلك بعض الشيء.

تصنيف الهيدروكربونات البترولية:

يصنف الكيميائيون الهيدروكربونات البترولية petroleum hydrocarbons إلى خمسة أصناف وهي الزيت الأسود والزيت المتطاير والغاز المتراجع والغاز الرطب والغاز الجاف.

وتكون الزيوت السوداء والمتطايرة في حالة سائلة داخل الخزان الجوفي، ويتميز الزيت الأسود black oil بجزيئاته الطويلة والثقيلة وغير المتطايرة وعادة ما يميل لونه إلى السواد ولكنه قد يكون ضارباً إلى الإخضرار أو بنياً، كما أن نسبة الغاز إلى الزيت به حوالي ٢٠٠٠ قدم مكعبة في البرميل أو أقل ودرجة الجودة أقل من ٤٥°، أما الزيت المتطاير volatile oil فهو يتميز باحتوائه على جزيئات متوسطة الطول ويتراوح لونه ما بين البني والبرتقالي والأخضر ونسبة الغاز إلى الزيت به ما بين ٢٠٠٠ إلى ٣٣٠٠ قدم مكعبة/ برميل ودرجة الجودة حوالي ٤٠° أو أعلى، وأما الغاز المتراجع retrograde gas فهو يكون في الحالة الغازية تحت ضغط الخزان الأصلي ولكنه يتحول إلى الحالة السائلة على هيئة متكثفات داخل الخزان الجوفي عند تدني ضغط الخزان مع عملية الإنتاج وتبلغ نسبة الغاز إلى الزيت نحو ٣٣٠٠ قدم مكعبة/ برميل أو أكثر، وأما الغاز الرطب wet gas فإنه يتواجد داخل الخزان في الحالة الغازية حتى أثناء الإنتاج ولكنه يعطي متكثفات سائلة على السطح وتصل نسبة الغاز إلى الزيت حوالي ٥٠٠٠٠ قدم مكعبة/ برميل أو أكثر، وأما الغاز الجاف dry gas فهو يتكون أساساً من الميثان النقي ولا ينتج أية متكثفات سواء كان ذلك داخل الخزان الجوفي أو عند سطح البئر المنتجة.

وبالطبع فإن هذا التصنيف ضروري للغاية عند التعامل مع المعطيات الخزانية بهدف إجراء دراسات النمذجة ومحاكاة الخزانات للتعرف والتنبؤ بالأداء المستقبلي لتلك الخزانات ومعرفة الإحتياطيات البترولية بها ووضع أنسب الخطط لتنمية الحقول.

الجزء الثاني

الاستكشاف والحفر

الفصل الثاني عشر
طرق الاستكشاف الجيولوجي والجيوفيزيائي في البحث عن البترول

الهدف من الاستكشاف:

طرق الاستكشاف والبحث عن البترول والغاز الطبيعي هي الأساليب الفنية المستخدمة في هذا الشأن ومهمتها الرئيسة ليست العثور على البترول مباشرة وإنما الحصول على الحقائق الفيزيائية عن الظواهر الجيولوجية التي تدل على التجمعات البترولية ومن شأن التفسير الجيولوجي للمعلومات المتيسرة بهذه الطرق أن يؤدي في النهاية إلى الحفر واكتشاف الزيت أو الغاز بمنطقة ما، بل والتنمية الرشيدة للكشف الجديد في المرحلة التالية.

ويؤدي الجيولوجي دوراً رائداً في هذا المجال لما له من دراية مكتسبة ومعرفة جيدة بطبيعة الأرض وبنيتها التركيبية والترسيبية وما تحتويه أيضاً من صخور متنوعة وما مر بها من أحداث ذات مدلولات خاصة، فهناك جيولوجي البترولpetroleum geologist الذي يرتبط عمله بالأعمال والمهام الجيولوجية والجيوفيزيائية والجيوكيميائية المتعلقة بالبترول والغاز الطبيعي، وهناك جيولوجي الاستكشاف exploration geologist الذي يكرس جهده حول قضايا الاستكشاف والبحث عن البترول، وهناك جيولوجي التنمية development geologist الذي يتعاظم دوره في كيفية تنمية الحقول المكتشفة وتقديم المشورة بالنسبة لمواقع الآبار المقترحة للتنمية والاستغلال الأمثل للحقل، وإضافة إلى ذلك فلدينا الجيوكيميائي petroleum geochemist الذي تخصص في استخدام علوم الكيمياء في البحث عن البترول واستغلال الحقول المنتجة، وأخيراً وليس آخراً هناك الجيوفيزيائي geophysicist الذي يكرس وقته وجهده من أجل رسم خريطة جيوفيزيائية وبيان إمكانيتها البترولية، بل لقد تخطى دوره مؤخراً إلى إسهامه في عمليات التنمية والإنتاج باستخدام أحدث التقنيات الجيوفيزيائية في هذا المجال، وهو ما سوف نعرض له بالشرح في هذا الفصل وغيره من فصول هذا الكتاب.

المسح الجوي:

قبل الشروع في عمليات البحث في أرض جديدة وقبل أن يذهب المساحون أو الجيولوجيون إلى هناك يجري في العادة تصوير شامل للمنطقة من الجو حيث تقوم طائرات معدة لهذا الغرض بالتحليق فوق المنطقة وتصويرها، كما يمكن أيضاً الاستعانة بالصور الجوية aerial photographs التي التقطتها الرادارات والأقمار الاصطناعية، وبدراسة هذه الصور يكون بالإمكان وضع خريطة طبوغرافية صحيحة وأخرى جيولوجية تبين ملامح الطبقات الجيولوجية بالمنطقة، ومن شأن هذه الخرائط لا أن تساعد على تخطيط المسح الأرضي فحسب، بل أيضاً في نقل الجيولوجيين بالطائرات المروحية مباشرةً إلى أهم المواقع وأدعاها للأمل، فلم يعد هناك أي سبب يحمل المساحين أو الجيولوجيين على التخبط في غياهب الأحراش الاستوائية أو الصحاري القاحلة حيث يجري الكثير من عمليات البحث عن البترول، ولقد بلغت فائدة المسح الجوي حداً بات معه من المعتاد تصوير المناطق التي سبق البحث فيها أرضاً وذلك من أجل إعادة تقييمها وكذلك تلك المغمورة بالمياه، ثم إن التصوير الجوي على نطاق واسع ذو قيمة لا تحد في تخطيط مسالك الطرق وخطوط الأنابيب ومواقع الآبار والمخيمات والأعمال اللوجستية المختلفة.

المسح الجيولوجي:

المسح الجيولوجي بهدف البحث عن البترول ليس بالأمر الهين فهو جهد متواصل يسعى إلى رسم خريطة جيولوجية للمنطقة المراد دراستها وتحديد إمكانيتها البترولية، وكما ذكرنا آنفاً لابد أن تتوافر لنا خريطة طبوغرافية وأخرى جيولوجية على قدر كبير من الحرفية بالإضافة إلى بعض القطاعات الجيولوجية في اتجاهات مختلفة، كما أن الحصول على بيانات عن نوعية الصخور وتوزيعاتها ومكاشفها وخصائصها الفيزيائية وما قد تحتويه من حفريات وميولها وامتداداتها هي أمور لازمة لإيجاد تلك الخرائط وتحتاج إلى فريق عمل على مستوى عال وقادر على التفسير واستنباط النتائج، وقد يكون الأمر هيناً بعض الشيء بالنسبة للمناطق ذات الطبيعة المكشوفة، أما تلك المغطاة بالتجمعات السطحية كرواسب الأنهار أو طبقات الجليد أو تلك التي تكون فيها الدلائل السطحية غامضة أو

نادرة يصبح العمل بها أكثر تعقيداً وصعوبة، ومن المحتمل ألا تمكننا الوسائل السابقة من التعرف عليها وفك غموضها وليس أمامنا إلا حفر عدد من الآبار أو استخدام الوسائل الجيوفيزيائية المختلفة والتي أثبتت فاعليتها في دراسة ما تحت السطح لدرجة كبيرة كما سنرى فيما بعد.

ولقد كان الإعتماد في الكشف عن البترول في بادئ الأمر ومنذ أكثر ما يزيد عن قرن من الزمان على الحفر العشوائي random drilling ووجود النشوع البترولية seepages خاصة بعد إكتشاف البترول في بئر دريك بولاية بنسلفانيا الأمريكية في عام ١٨٥٩ والتي كان حفرها عند نشع للزيت بالمنطقة وكان الهدف من هذه البئر هو رفع معدل تدفق الزيت إلى السطح الذي جاء من عمق ضحل للغاية (٢١ متراً) وبلغ قدراً متواضعاً حوالي ٢٠ برميلاً في اليوم، كذلك فقد كان الحفر لا يستند إلى عمل جيولوجي ولكن على مبدأ: ما دام البترول موجوداً هنا فهو موجود أيضاً بمنطقة الجوار closeology، ولكن الأمر لم يدم على هذا الحال فلم تكن النشوع البترولية بالوفرة التي تؤهلها لعمليات الاستكشاف وتلبية الحاجة التي تنامت للعثور على البترول بصورة اقتصادية، ومن ثم كان الاتجاه نحو التطبيق العلمي السليم باستخدام الوسائل والتقنيات الجيولوجية والجيوفيزيائية وهو ما قدمته المسوح الجيولوجية ولحقت بها شقيقاتها الجيوفيزيائية والجيوكيميائية على نحو متكامل ولصيق.

المسح الجيوكيميائي:

بدأ الاهتمام بهذا النوع من الاستكشاف في بلاد الاتحاد السوفيتي السابق، ولم يكن قد انطلق إلى الخارج إلا في الفترة الأخيرة حيث إن قيمته العلمية لم تكن مؤكدة بعد وتحتاج إلى الكثير من التجارب والتحاليل، وترجع أهمية التطبيقات الجيوكيميائية إلى الأسباب الآتية:

- الكشف عن الشّاذات أو المغايرات anomalies السطحية التي تنشأ عن وجود التجمعات الهيدروكربونية في باطن الأرض حيث هناك إمكانية لتسرب كميات صغيرة من المركبات البترولية إلى السطح وعادة ما تكون غازات يمكن الكشف عنها بعد أخذ عينات من التربة وتحليلها، كما يمكن تحري وجود البكتيريا مما قد ينم عن وجود آثار مجهرية من الغازات الهيدروكربونية.

- تقييم الإمكانية البترولية للمنطقة وعلى الأخص فيما يتعلق بصخور المصدر وتصنيفها تبعاً لدرجة النضج البترولي.
- تحديد نوع الزيت الخام عن طريق التحاليل الكيميائية المتقدمة وما يمكن تبعاً لذلك من وضع تفسيرات حول طبيعة صخور المصدر والمسارات المحتملة لهجرة الزيت كما يمكن بالتالي التفرقة بين أنواع الزيت الخام ليس فقط بالتجمعات الهيدروكربونية داخل منطقة ما بل وفي الوحدات المنتجة بالحقل الواحد وإذا ما توافر عدد كاف من العينات التي أخذت أثناء المراحل الأولي من الاستكشاف وتم تحليلها كيميائياً فسوف يساعد الباحث في معرفة كيفية الانسياب الجانبي cross flow بين الوحدات المنتجة وتفسير ظاهرة النضوب التفضيلي preferential depletion لتلك الوحدات.

ومن هذا تتبين الأهمية المستقبلية لهذا النوع من النشاط الاستكشافي ليكون أداة فعالة في مجالات البحث عن البترول وكذا تنمية الحقول المنتجة.

الاستكشاف الجيوفيزيائي:

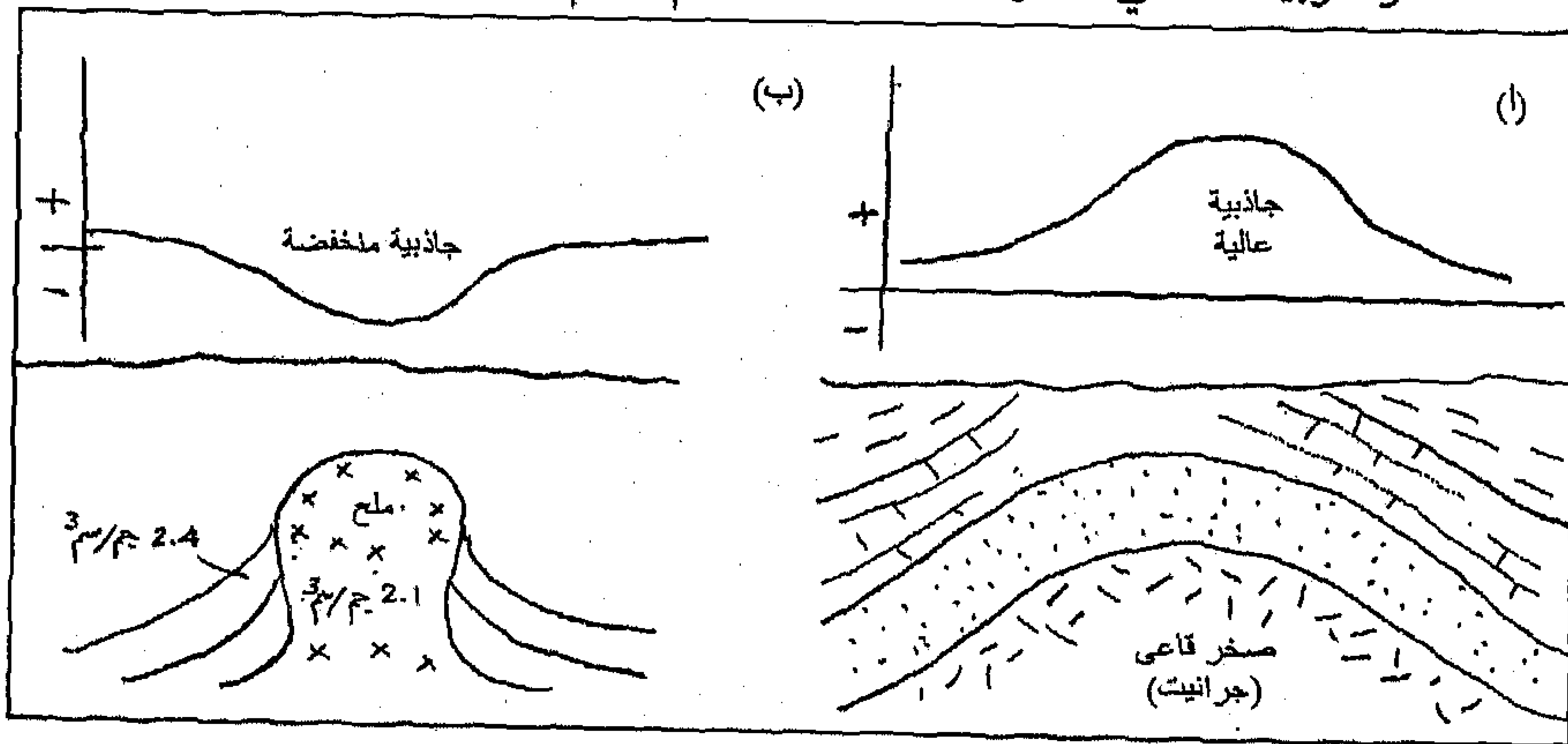
يعود المسح الجيوفيزيائي في تاريخه إلى أواسط العشرينيات من القرن الماضي، فبعد اكتشاف العديد من التكوينات الجيولوجية المحتوية على البترول بالوسائل الجيولوجية المستخدمة آنذاك والتي تركزت أساساً على ما كان بالإمكان رؤيته على وجه الأرض ظهرت الحاجة للعثور على تلك التكوينات التي لم يمكن الكشف عنها بتلك الوسائل، وكان أن جرت تجربة الطرق الجيوفيزيائية حيث أدت طريقة قياس الجاذبية الأرضية (بواسطة ميزان الالتواء) إلى اكتشاف العديد من قباب الملح والتي ارتبط بعضها بوجود البترول هناك، وقد أعطى ذلك انطباعاً مشجعاً بأن تحل الجيوفيزياء محل المسح الجيولوجي وكان أن ظهرت بعد سنوات قليلة الطريقة السيزمية كأداة جيوفيزيائية جديدة حققت المزيد من النجاح في الكشف عن التشكيلات المحتوية للبترول في عدد من الأماكن التي لم ينبئ ظاهرها عن تكوين باطنها، وتُعرف الجيوفيزياء بأنها تطبيقات الفيزياء والرياضيات لدراسة الأرض، وفي هذا الشأن لابد أن يكون الجيوفيزيائي geophysicist على دراية جيدة بعلوم الأرض والفيزياء والرياضيات، وعلى الرغم من تعدد الطرق الجيوفيزيائية (السيزمية، الجاذبية، المغناطيسية، الكهربية، الإشعاعية،

الحرارية وغيرها) المستخدمة في مجالات كثيرة في البحث والتنقيب عن المعادن والبترول والمياه الجوفية وأعمال الجيوتكنيك الهندسية إلا أنه في مجال البحث عن البترول يتركز الاهتمام على ثلاث طرق أساسية هي طريقة الجاذبية والمغناطيسية والسيزمية ويذهب الجزء الأعظم من نفقات الاستكشاف على الطريقة السيزمية، والتي تتمتع بقسط وافر من التقدم التكنولوجي والكفاءة المتميزة، بالرغم من تكلفتها العالية مقارنة بالطريقتين الأخريين، ولنتناول بشيء من التفصيل الطرق الجيوفيزيائية الثلاث.

طريقة الجاذبية (التثاقلية):

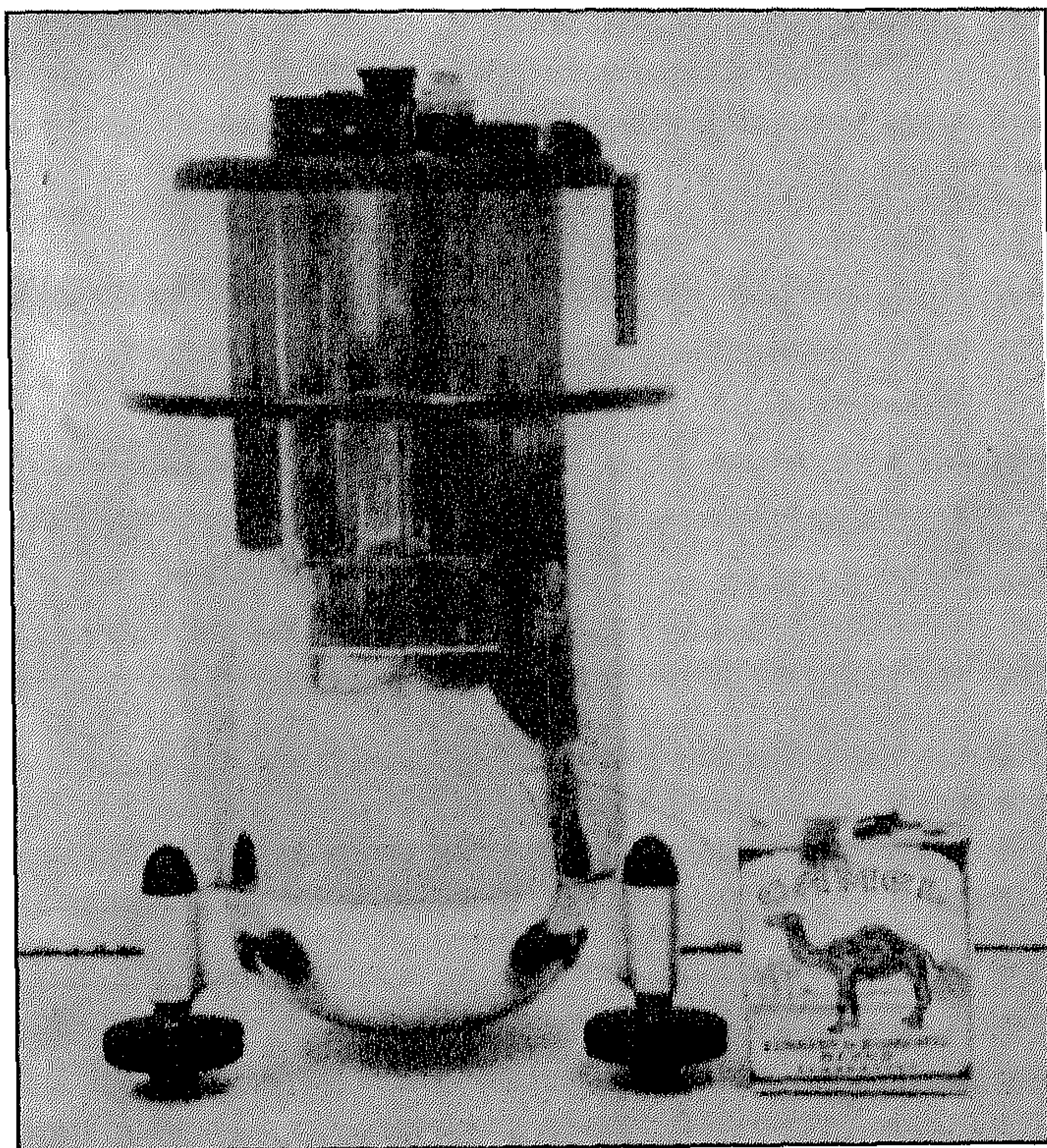
تسجل قياسات الجاذبية gravity التغيرات الصغيرة في شدة الجاذبية gravitational pull من التكوينات الصخرية وحتى أعماق بعيدة قد تصل إلى آلاف الأمتار من سطح الأرض، وتختلف الصخور من حيث كثافتها، فالصخور الأكثر كثافة لها شدة جاذبية أكبر، وإذا ما كانت الصخور الأكبر كثافة قد تقوست إلى أعلى في هيئة طية محدبة مثلاً فإن مجال الجاذبية الأرضية فوق محور الطية يكون أكبر منه على طول الجوانب ويقال في هذه الحالة أن لدينا جاذبية مرتفعة gravity high، ومن ناحية أخرى إذا كانت هناك قبة ملحية تكون قيمة الجاذبية المقاسة فوق هذه القبة أصغر مقارنة بتلك المقاسة على أي من الجانبين حيث إن كثافة الملح أقل من كثافة الصخور التي اخترقها، وتسمى المغايرة (الشاذة) في هذه الحالة جاذبية منخفضة gravity low كما هو موضح في الشكل ١٢-١.

كما أن طريقة الجاذبية تبدو فعالة عند تحديد الأحواض الترسيبية حيث تكون صخور القاعدة التي تسفلها ذات كثافة أعلى (٢٫٧ - ٣٫٢ جم/ سم³) مقارنة بكثافات الرسوبيات التي تعلوها (٢ - ٢٫٦٥جم/ سم³).



شكل ١٢-١: الجاذبية المرتفعة والجاذبية المنخفضة.

وتقاس شدة الجاذبية بأجهزة صغيرة الحجم نسبياً ويمكن حملها بسهولة وتعرف بأجهزة قياس الجاذبية gravimeters (شكل ١٢-٢) والوحدة المستخدمة في القياس هي المليجال milligal وهي ١/١٠٠٠ من الجال gal (نسبة إلى العالم الإيطالي جاليليو Galileo)، ويقدر الجال بالسنتيمتر/ الثانية المربعة، وهناك وحدة أخرى تستخدم كثيراً في العمل الحقلي وهي وحدة الجاذبية gravity unit وتساوي ٠،١ من المليجال، وذلك بسبب ضآلة التباينات في قيم الجاذبية المقاسة، ونظراً لأن مغايرات شذات الجاذبية التي يتم الحصول عليها في استكشاف البترول ربما تمثل فقط جزءاً من المليون أو حتى جزءاً من عشرة ملايين من القيمة الكلية لمجال الأرض فإن أجهزة الجاذبية مصممة لقياس التغير في قوة الجاذبية من مكان لآخر أكثر من القوة المطلقة نفسها، كما أن الأجهزة الحديثة منها شديدة الحساسية لدرجة أنه يمكنها كشف المغايرات في الجاذبية لجزء من مائة مليون لعجلة الأرض الكلية.



شكل ١٢-٢: جهاز قياس الجاذبية (الجرافيمتر) من نوع واردن، لاحظ حجم الجهاز بالنسبة لعلبة السجائر.

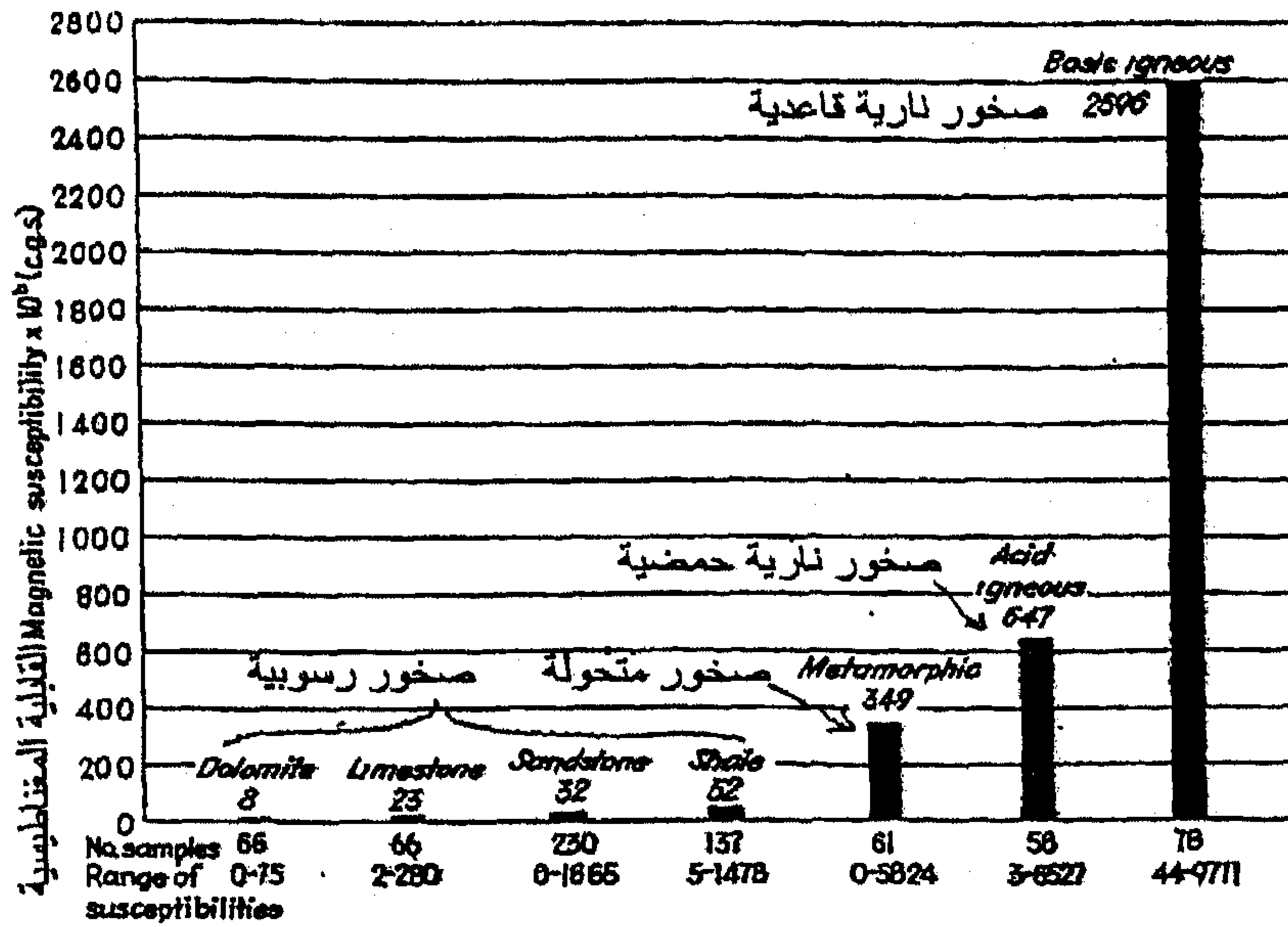
وبالطبع فإن الأمر ليس بهذه السهولة حيث إن قراءات الجاذبية تحتاج إلى عدد من التصحيحات بسبب العوامل المؤثرة عليها من تضاريس وخلافه، كذلك فإن من شأن التحليل الرياضي واستخدام الحاسوب لمعرفة مقدار واتجاه قوة الجاذبية الأرضية عند نقطة القياس أن يدل على وجود تكوينات جيولوجية مختفية في باطن المنطقة بل أن يحددها بدقة فائقة إذا كانت الأحوال مواتية.

هذا وقد امتد قياس الجاذبية إلى البحر والمناطق المغطاة بالمياه حيث تجري القياسات بواسطة أجهزة محمولة على مراكب متحركة وعليها تسجل بصورة مستمرة تغيرات الجاذبية على اتساع المساحات المطلوبة.

وللعلم فإن المعلومات التي تتحقق من طريقة الجاذبية في مجالات استكشاف البترول والغاز الطبيعي تعتبر معلومات استطلاعية ولكنها قد تستخدم كأساس للتخطيط لمسوحات جيوفيزيائية أو جيولوجية لاحقة والتي تؤدي في العادة إلى معلومات تفصيلية أكثر، وتجدر الإشارة إلى أن حقل الغوار Ghawar field الذي يعتبر حقل البترول الأول في العالم كان قد تم اكتشافه في عام ١٩٤٨ عن طريق مغايرة عالية للجاذبية فوق التركيب الجيولوجي هناك، وتتكون المصيدة البترولية بالحقل من طية محدبة يبلغ طولها حوالي ٢٣٣ كيلومتراً وعرضها ٢١ كيلومتراً، أما الخزان الجوفي فيتكون من الحجر الجيري المتشقق من العصر الجوارسي (نطاق العرب D) بسمك فعال يقدر بنحو ٨٠ متراً ويقع الخزان عند عمق حوالي ٥٠٠ متر تحت سطح البحر كما أن تماس الزيت-الماء تحدد عند عمق ٦٠٠ متر، وتعمل طبقات الملح من تكوين حيط Hith كصخور مانعة، ويتمتع الحقل بإنتاجيته العالية حيث يصل إنتاج البئر الواحدة به إلى نحو ١١٤٠٠ برميل من الزيت الخام في اليوم، ويتوقع أن يعطي إجمالياً من الخام يقدر بنحو ٨٢ بليون برميل.

الطريقة المغناطيسية:

تعتمد الطريقة المغناطيسية magnetic method على قياس التغير في المجال المغناطيسي للأرض الذي يرجع إلى التغير في التركيب أو القابلية للتمغنط magnetic susceptibility لبعض الصخور القريبة من السطح، وللصخور الرسوبية عامة قابلية للتمغنط ضئيلة للغاية مقارنة بالصخور النارية أو المتحولة التي تميل إلى احتوائها على كمية أعلى من معدن الماجنيتيت magnetite (Fe_3O_4) ذي الخصائص المغناطيسية المتميزة (شكل ١٢-٣).



شكل ١٢-٣: قياسات معملية للقابلية المغناطيسية في الصخور المختلفة.

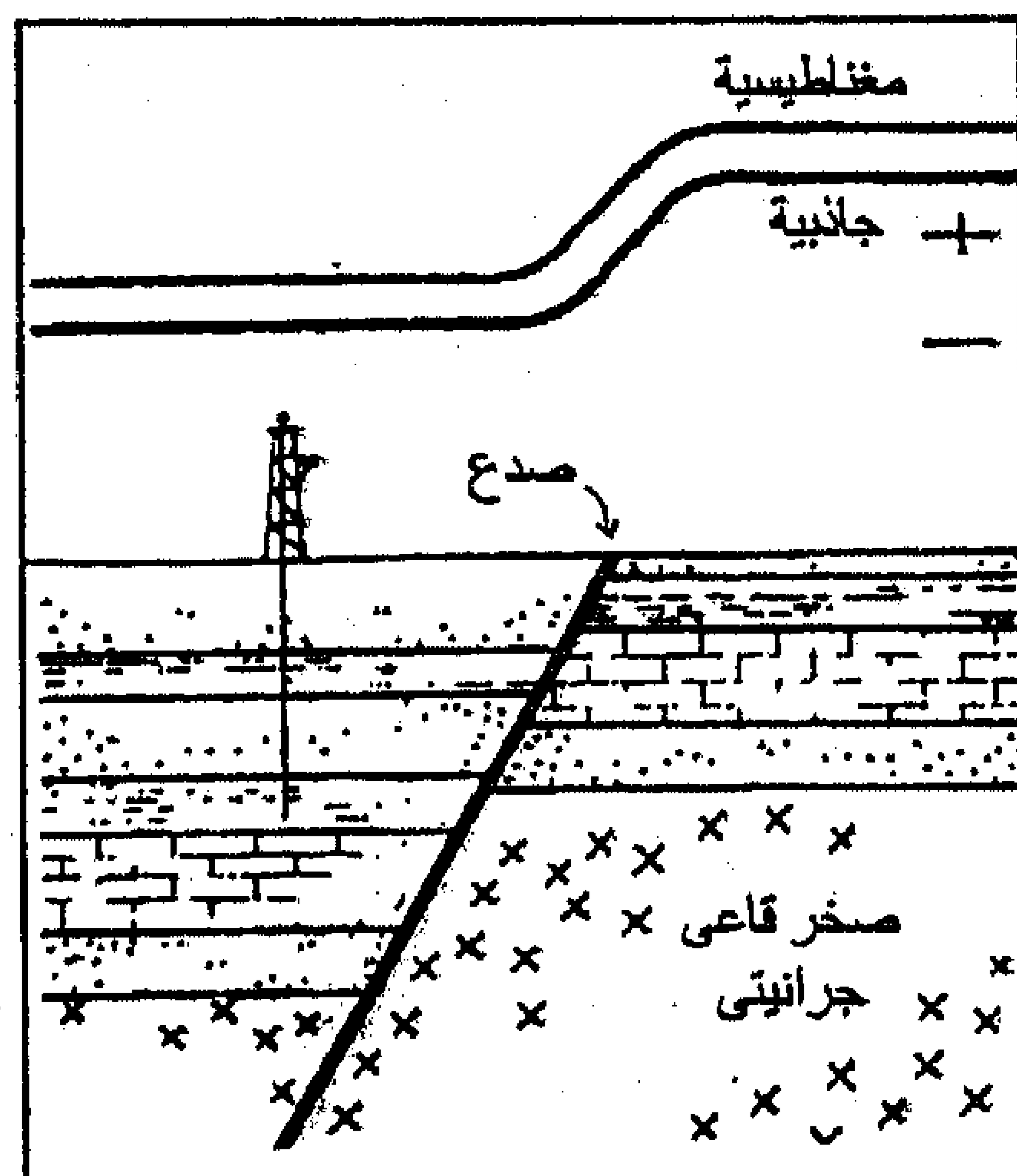
وتصمم المساحات المغناطيسية لتخريط تراكيب على أو داخل صخور القاعدة أو لكشف مواقع المعادن المغناطيسية مباشرة، وقد استخدمت الطريقة المغناطيسية في البداية لاستكشاف حقول البترول في المناطق التي تكون فيها التراكيب في الطبقات الرسوبية الحاملة للبترول محاطة بمعالم جيولوجية مثل الصدوع وغيرها على سطح صخور القاعدة كما سوف نشاهده في أمثلة لاحقة.

ووحدة القياس في الطريقة المغناطيسية هي الجاما gamma وهي تساوي $١٠^{-٩}$ من الأورستيد Oersted وشدة المجال المغناطيسي للأرض تبلغ نحو ٠٫٥ أورستيد، ويعرف الجهاز الذي يقيس شدة المغناطيسية بالمغناطومتر magnetometer، ويمكن تنفيذ الاستكشاف المغناطيسي على الأرض أو من الطائرة أو من السفن وتتم في العادة أعمال الرصد الأرضي في محطات ثابتة،وفي المسوح البحرية والجوية تسجل المجالات المغناطيسية باستمرار من أجهزة قياس ومراقبة متحركة، كذلك فإن العمليات الحقلية في الاستكشاف المغناطيسي للبترول تكون في العادة مختلفة بعض الشيء عن تلك المستخدمة في استكشاف المعادن، فالمسافات بين المحطات في الأعمال الأرضية أو المسافات بين الخطوط في الأعمال البحرية أو الجوية تكون أكبر في البحث عن البترول

(حوالي كيلومتر) عنها في استكشاف المعادن (٨ أمتار) كما أن الأجهزة الأرضية لقياس المغناطيسية قلما تستعمل في أعمال المساحة الخاصة بالبترول حيث إن كل الاستكشاف المغناطيسي للبترول يتم من السفن أو الطائرات.

وبالطبع فإن معطيات المسح المغناطيسي تحتاج إلى عدد من من التصحيحات التي يلزم عملها وإزالة التأثيرات المختلفة حتى يمكن قراءة النتائج ورسم الخرائط بقدر كبير من الموثوقية، كما قد يتطلب الأمر أيضاً استخدام الحاسوب لتسهيل الحسابات وتخريط البيانات.

وعادة ما تتوافق نتائج تفسيرات البيانات المغناطيسية مع مثيلاتها الناتجة عن المساحة الجاذبية خاصة في الحالات التي ترتبط بوجود صخور القاعدة وما يعلوها من رسوبيات (شكل ١٢-٤) حيث يمكن تحديد عمق هذه الصخور وكذا سمك الرسوبيات، كما يمكن أيضا تحديد المعالم التركيبية كالطيات والصدوع وغيرها، وهذا ما يفيد كثيراً في استكشاف البترول.



شكل ١٢-٤: توافق نتائج المغناطيسية والجاذبية.

الاستكشاف عن طريق المسح السيزمي:

الاستكشاف السيزمي seismicexploration هو أكثر الطرق الجيوفيزيائية استخداماً وعلى الأخص في أعمال البحث والتنقيب عن البترول والغاز الطبيعي، ويرجع أول كشف بترولي بالطرق السيزمية منفردة إلى عام ١٩٢٨ حيث تم اكتشاف حقل سمينول Seminole بولاية أوكلاهوما الأمريكية، وتعتمد المساحة السيزمية على انتقال الموجات

الصوتية داخل الطبقات الصخرية وكيفية انتقال تلك الموجات وسرعتها في هذه الأوساط المرنة، ولتحقيق ذلك لابد من توافر مصدر للموجات الصوتية عند نقطة معينة وتعيين الزمن الذي استغرقته هذه الموجة عند وصولها إلى نقاط أخرى سواء بعد انعكاسها أو انكسارها عند الحدود الفاصلة بين الطبقات المختلفة، وإذا عرف هذا الزمن أمكن تحديد أعماق هذه الحدود.

ونظراً لأهمية وفاعلية الطريقة السيزمية في استكشاف البترول وما صادفته من تحسينات وتقدم هائل في تقنياتها فيما يتعلق باكتساب ومعالجة وتفسير البيانات فسوف نتطرق إلى ذلك ببعض الشرح.

- **اكتساب المعطيات:**

تتعرض هذه المرحلة من المسح السيزمي إلى كيفية اكتساب المعطيات data acquisition والحصول عليها أثناء العمل الحقلي، وفي هذا الشأن تستخدم الطريقة السيزمية طاقة صوتية يتم توليدها على السطح أوداخل ثقوب أو حفر تعد لهذا الغرض، وتنتقل هذه الطاقة أو الموجة الصوتية داخل الصخور التحتسطحية حيث تنعكس أو تنكسر ثم تنعكس بعد ذلك عند السطوح الفاصلة بين الطبقات وترتد إلى السطح حيث يتم تسجيلها هناك بواسطة أجهزة خاصة، وإذا ما تحدد الزمن الذي استغرقته الموجة الصوتية من بدء انطلاقها وحتى ارتدادها إلى السطح فإنه يمكن تحديد عمق سطح الإنعكاس والكشف فيما بعد عن التشكيلات الجيولوجية الجوفية.

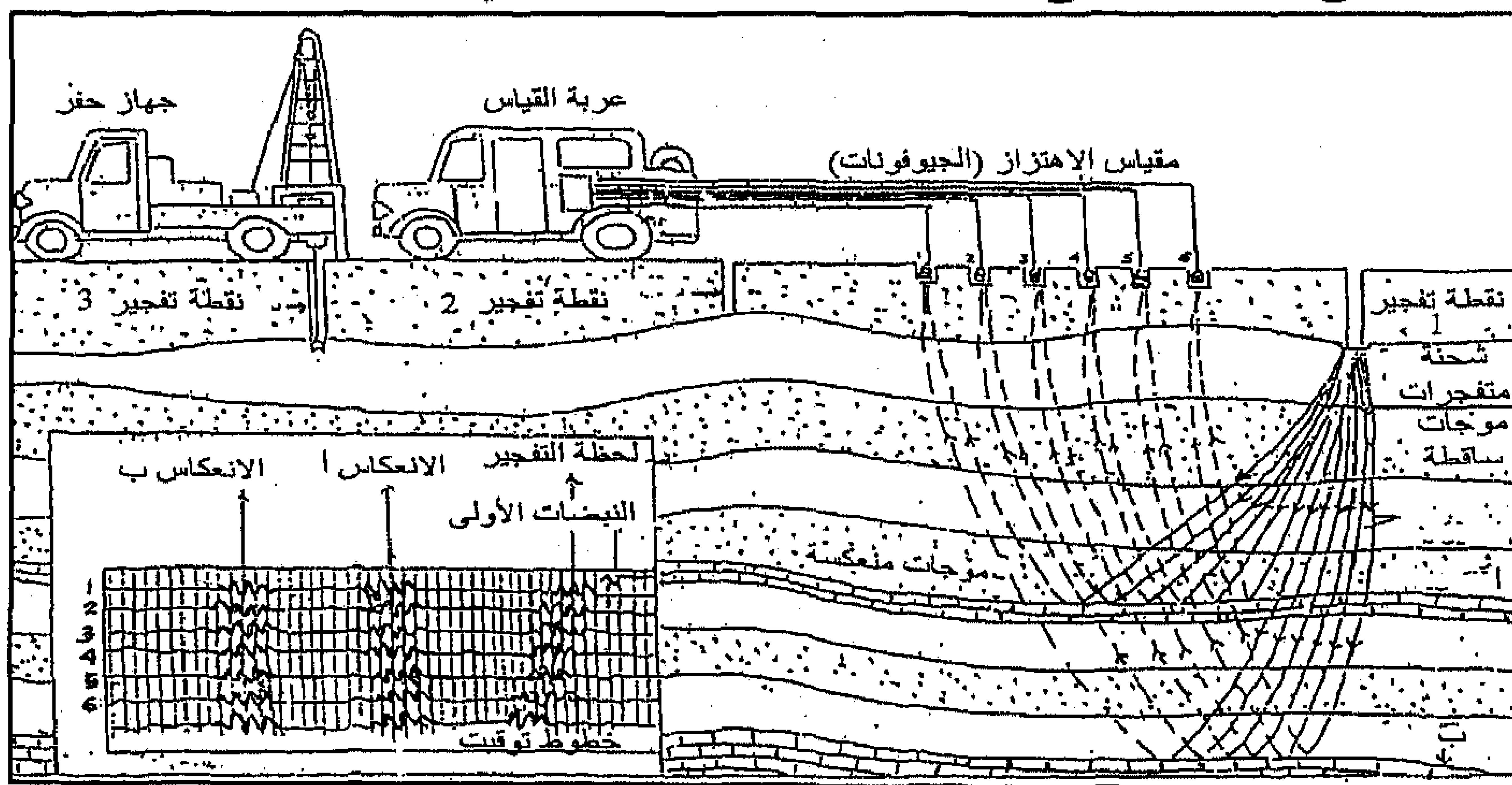
وثمة أسلوبان للمسح السيزمي أعمها استعمالاً أسلوب تسجيل الانعكاسات reflections ويستند إلى أن الاهتزازات الناجمة عن التفجير تنعكس جزئياً على الحدود بين طبقتين مختلفتي الكثافة والوقت الذي يقتضيه انتقال الموجات من نقطة التفجير إلى سطح الأرض نزولاً إلى الطبقة العاكسة ثم صعوداً إلى مقياس الاهتزازات (الجيوفون) geophone على السطح ويشير إلى عمق الطبقة العاكسة شرط أن تكون سرعة الموجات في الطبقات الصخرية المتوالية معروفة.

والأسلوب الثاني للمسح السيزمي هو تسجيل الانكسارات refractions ويستند هذا إلى أن انتقال موجات الطاقة في التكوينات المتماسكة كالحجر الجيري والملح أسرع من انتقالها في التكوينات التي هي أقل كثافة منها، فالاهتزازات تغير اتجاهها (تنكسر) عند الحدود بين طبقتين مختلفتي السرعة في إرسال الموجات، ويمكن أن تبلغ الموجات مقاييس

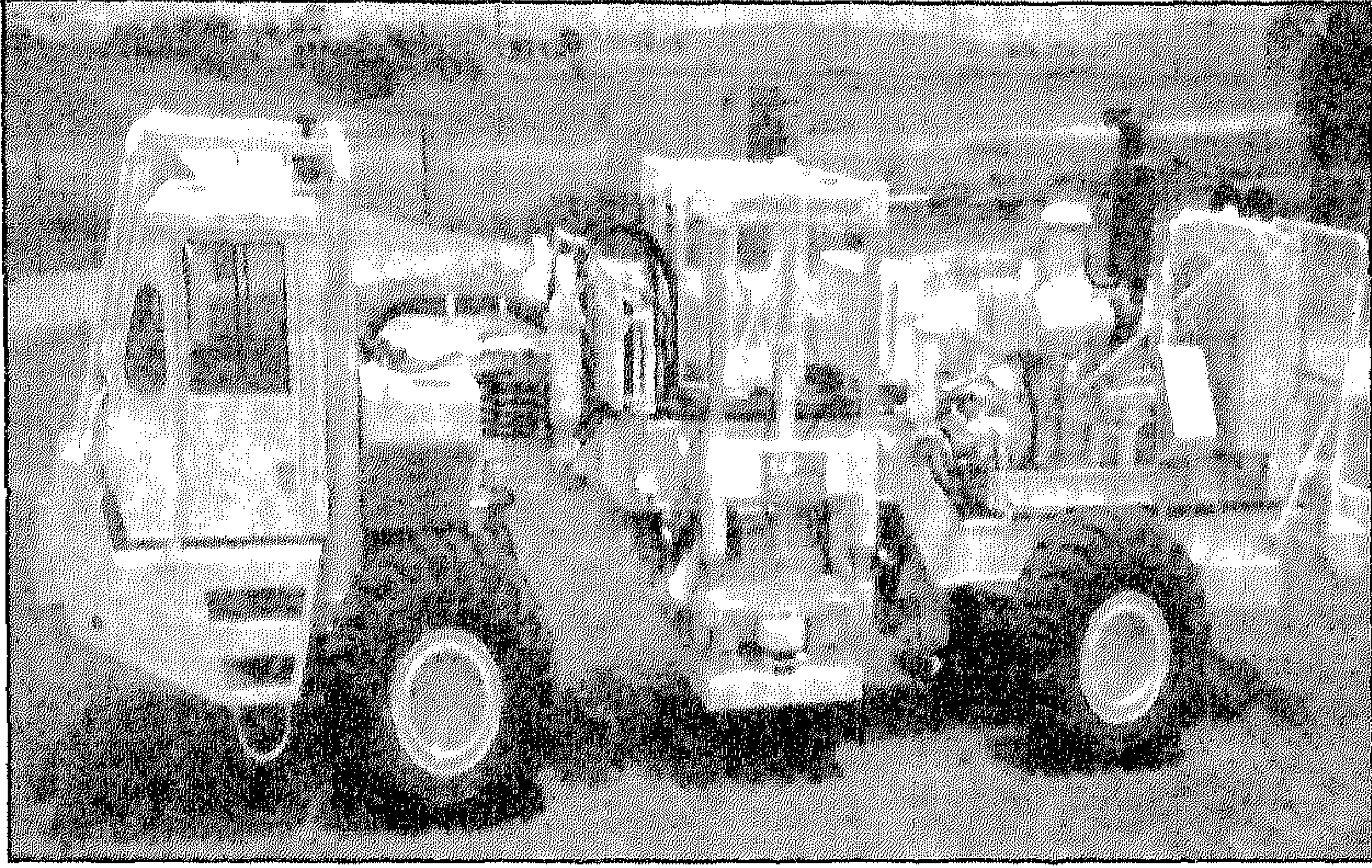
الاهتزازات على سطح الأرض إذا ازدادت سرعتها مع ازدياد العمق والوقت الذي يقتضيه وصولها إلى مقاييس الاهتزازات (الجيوفونات) وكثيراً ما يتيح لنا الاستدلال على الصخور التي انتقلت عبرها الموجات ومعرفة خصائصها وأعماقها.

وتسجل الأجهزة السطحية جميع الإشارات signals الصادرة عن تلك الاهتزازات الصوتية وأيضاً تلك الضوضاء noise التي قد تحدثها الحركة على السطح بفعل الرياح أو موجات الهواء وغيرها، ولكن كل هذه التأثيرات (التشويشات) يمكن تلافيها وإزالتها عند معالجة البيانات ومن خلال برنامج خاص.

وعند إجراء المسح السيزمي على الأرض land survey (شكل ١٢-٥) يستخدم الديناميت dynamite والفيبروسيز vibroseis كمصادر لتوليد الطاقة الصوتية اللازمة للمسح، وقد شاع الديناميت كمصدر رئيس للطاقة المطلوبة خاصة في المناطق المغطاة بالرمال السائبة والسبخات وتكثر المستنقعات بها، ولهذا الغرض تحفر ثقوب غير عميقة (١٨-٣٠ متراً) لوضع شحنة الديناميت قبل تفجيرها داخل الثقب، أما في الوقت الحالي فإن ٧٠٪ من الاستكشاف السيزمي يتم بواسطة الفيبروسيز وذلك عن طريق شاحنة هزازة vibrator truck (شكل ١٢-٦) مزودة بموتورات هيدروليكية تعمل على هز الأرض لفترات زمنية قليلة (٧-٢٠ ثانية) ومن ميزة تلك الشاحنات أنه يمكن تحريكها حتى داخل المناطق المزدحمة، وهناك أيضاً أساليب أقل استخداماً مثل طريقة إسقاط حمل ثقيل لعدة مرات أو بإطلاق مدافع الهواء وجميعها تسبب رجفات واهتزازات صوتية لازمة لعملية المسح، ويعرف الموقع الذي ينطلق منه المصدر السيزمي بنقطة التفجير shot point.



شكل ١٢-٥: رسم تخطيطي للمسح السيزمي على اليابسة.

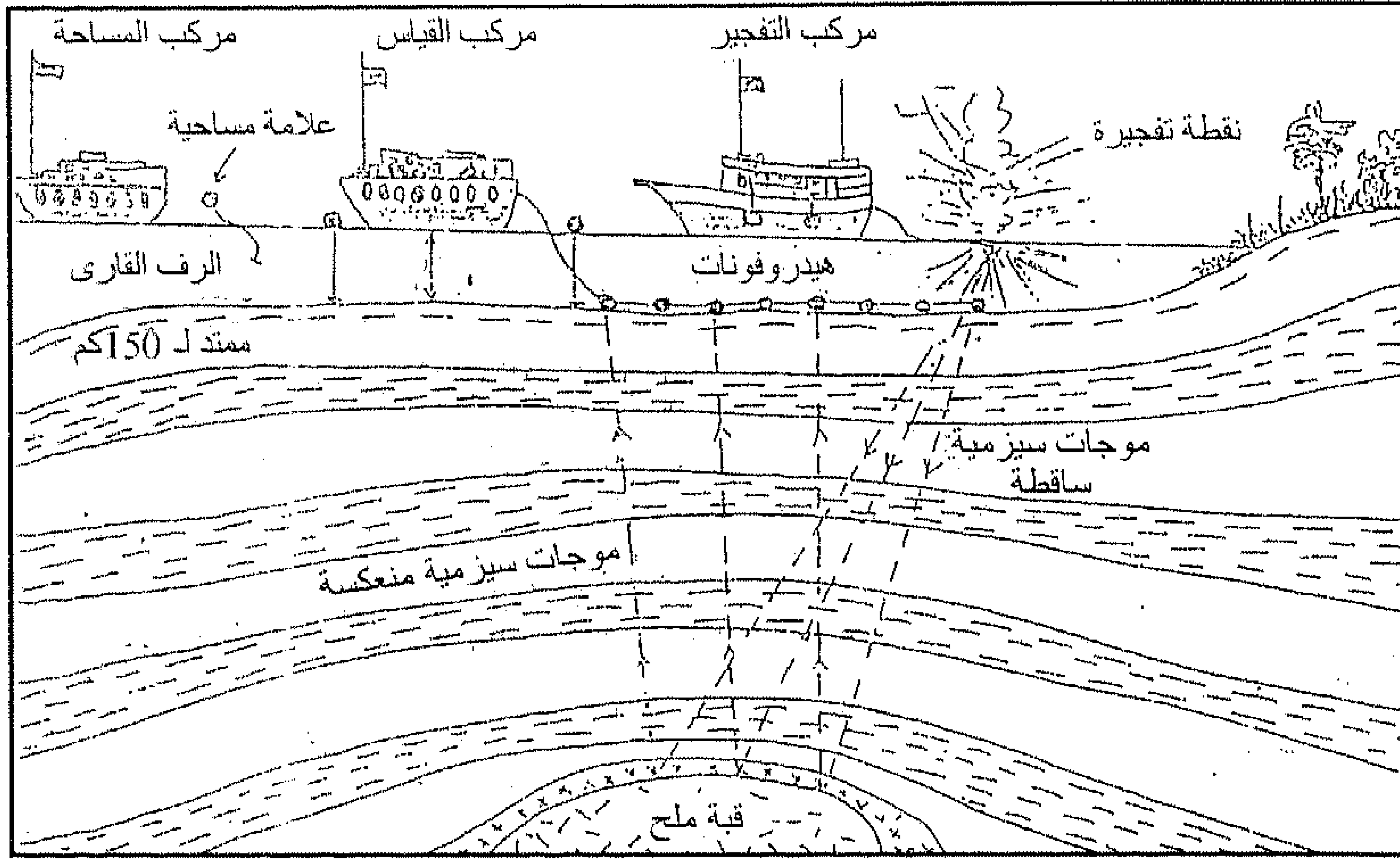


شكل ١٢-٦: الشاحنة الهزازة لاستخدام الفيبروسيز في المسح السيزمي.

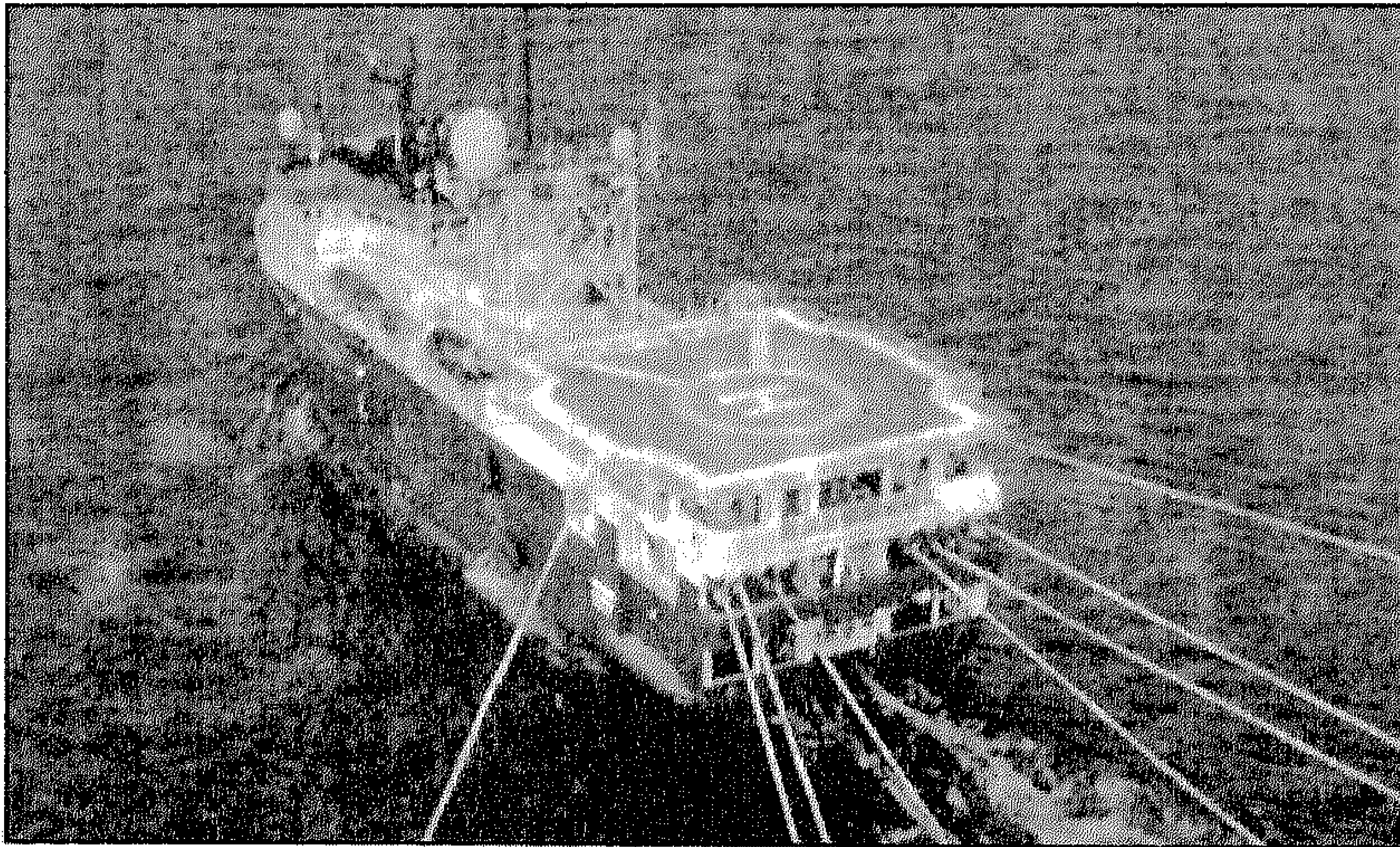
وعند المسح الأرضي تعمل مقاييس الاهتزازات (الجيوفونات) على تحويل الاهتزازات الأرضية إلى إشارات كهربية وذلك من خلال ملف ومغناطيس يولدان قوة دافعة كهربائية تتغير تبعاً لاهتزازات الأرض أثر عملية التفجير، وتغرس الجيوفونات عادة في الأرض إما فرادي أو على هيئة مجموعات تعرف كل منها بالقناة channel، والهدف من هذا التشكيل هو تقليص الضوضاء، وعادة ما يستخدم مابين ٤٨ إلى ٩٦ قناة لنقطة توصيل واحدة، وتبعد كل قناة عن الأخرى مابين ١٧ و٣٤ متراً (٥٥ - ١١٠ قدم) وجميع الجيوفونات متصلة بكبل cable كهربائي يمتد إلى محطة التسجيل recording truck، ويمكن أن يتم تسجيل وحفظ البيانات على شرائط ممغنطة وذلك للرجوع إليها والتأكد من جودتها.

أما في المسح البحري offshore survey (شكل ١٢-٧أ) فيستخدم قارب يسير عادة خمسة أميال بحرية في الساعة ويقطر خلفه مصدر الطاقة السيزمية. ولإحداث هذه الطاقة هناك وسائل أخرى غير وسيلة التفجير منها مدفع الهواء air gun الذي يتكون من أسطوانة معدنية يبلغ طولها عدة أمتار وتجر على عمق ٦ - ٩ أمتار من سطح الماء ومتصلة بقارب المسح المزود بضواغط الهواء لضخ هواء تحت ضغط عال ٢٠٠٠ رطل / بوصة مربعة (١٤٠ كيلوجرام/ سم^{2}) داخل أنبوب مرن ومجوف، وعند إعطاء الأمر ينطلق

الهواء المضغوط إلى الماء محدثاً اهتزازات تكفي للغرض ولا تحدث أضراراً بيئية للحياة البحرية، كذلك فهناك طريقة إشعال الشرارة sparker وتقوم على تفريغ شحنة كهربائية في الماء تكون شرارة تحدث الاهتزازات المطلوبة والتي يتم تسجيلها فور ارتدادها من سطوح الانعكاس للتكوينات الصخرية الموجودة تحت السطح، وتعرف مقاييس الاهتزازات في المسح البحري بالهيدروفونات hydrophones وهي توجد داخل أنبوب طويل من البلاستيك قد يصل طوله ما بين ألف إلى ثلاثة آلاف متر ويقطر streamer خلف قارب المسح (شكل ١٢-٧ب).



شكل ١٢-٧أ: رسم تخطيطي للمسح السيزمي البحري.



شكل ١٢-٧ب: سفينة للمسح السيزمي البحري تغطي موقع الهواء وكذا أنبوب الهيدروفونات.

كما أن الأنبوب مملوء بسائل شفاف مثل الكيروسين ومتعادل بالنسبة للطفو في الماء وبجانب احتوائه للهيدروفونات فهناك الأسلاك التي تربط بين هذه الأجهزة وآلة التسجيل على السطح، ويحتوى الأنبوب على مئات الهيدروفونات التي تتشكل في هيئة مجموعات من ٢٥ إلى ٤٠ جهاز في كل مجموعة، كما أن هناك من مجموعتين إلى أربعة مجموعات من الهيدروفونات في كل قسم من الكبل والتي يمكن توصيلها ببعضها عند نهايتها، والتي تشكل في النهاية أنبوباً من ٩٦ إلى ٢٤٠ مجموعة والهدف من ذلك هو الحصول على تسجيلات موثوق بها وتقليص الضوضاء غير المرغوبة، هذا وتوجد وسائل للحفاظ على طفو الأنبوب عند عمق مناسب ما بين ٦ – ١٦ متراً (٢٠ – ٥٠ قدماً)، كما يتصل الطرف البعيد للكبل بعائمة عند الذيل ورؤية هذه العائمة أو تتبعها بواسطة الرادار يجعل من الممكن التعرف على مدى قرب الكبل من مسار طريق الحركة، فالتيارات غالباً ما تبعد الكبل عن مسار قارب المسح.

وبالنسبة لتسجيل البيانات فعادة ما تستخدم عدة أجهزة لنقطة تفجير واحدة حتى يمكن الحصول على نتائج أفضل بتفجير أقل، وتسمى بطريقة التكديس stacking أو طريقة نقطة العمق المشترك common-depth point (CDP) والتي تهدف أساساً إلى تقليص الضوضاء وتعظيم الإشارات الصادرة عن الانعكاسات، وتصنف المعلومات المحصلة في موقع العمل إلى قطاعات سيزمية، وقد استخدم في الآونة الأخيرة أسلوب العمل باستخدام الحاسوب والذي مكن من حل الكثير من المعضلات.

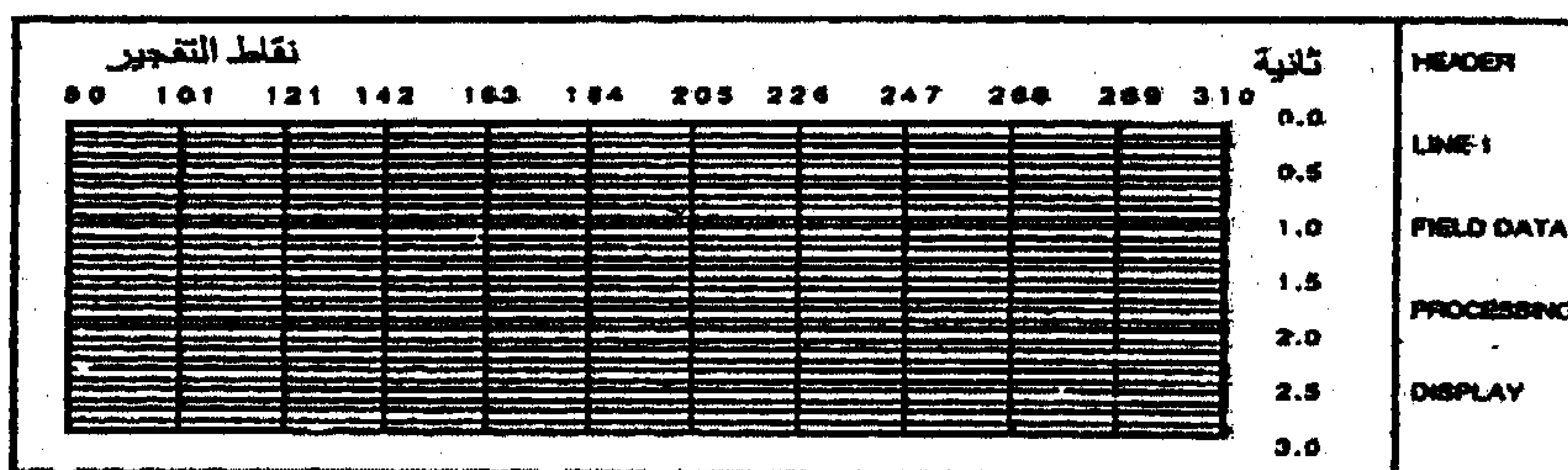
وهناك طريقة حديثة تعرف بطريقة التسجيل على قاع البحر ocean (OBC) bottom cable وتستخدم في المناطق البحرية ذات الأعماق الضحلة وتعتمد على مجموعة من الهيدروفونات والجيوفونات متصلة بكبل واحد موصل بوحدة التسجيل وتكون الهيدروفونات على سطح قاع البحر وبهذه الطريقة يمكن تجنب الضوضاء الناتجة عن حركة المد والجزر وبالتالي الحصول على نتائج ذات دقة عالية.

والجدير بالذكر أن تكلفة المسح السيزمي على اليابسة هي الأعلى خاصة في المناطق الوعرة، أما التكلفة في العمليات البحرية فهي أقل، كما أن جودة البيانات تكون أعلى من مثيلاتها على الأرض وقد تصل التكلفة في هذه الحالة إلى المليون دولار وربما أكثر من ذلك وهذا يتوقف على حجم العملية والمساحة التي يشملها البحث.

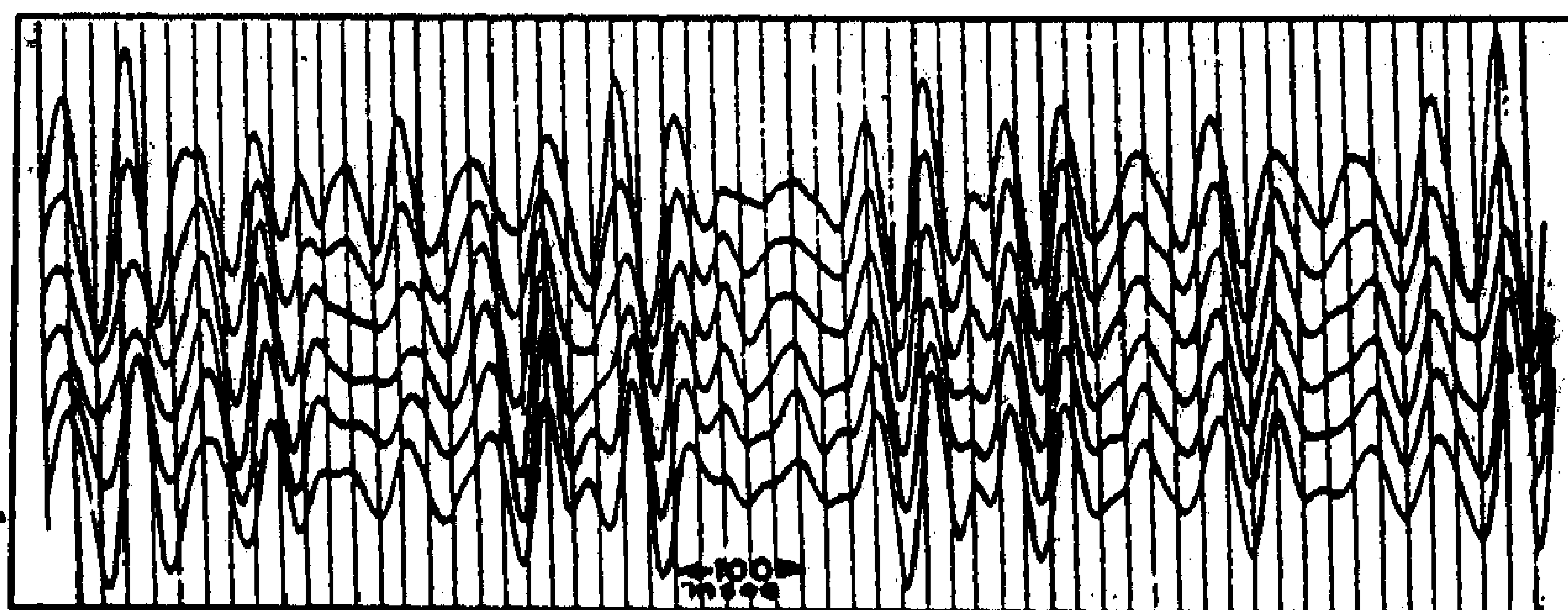
السجل السيزمي:

يتم تسجيل البيانات الواردة من المسح السيزمي على قطاع خاص يعرف بالسجل السيزمي (seismic record (seismogram وهو يشبه في مظهره القطاع الجيولوجي الرأسي ومقياس الرسم العمودي بالثانية أما المقياس الأفقي فيبدأ من الصفر كمنسوب لسطح البحر، وترسم خطوط الزمن في وضع أفقي في ١/ ١٠٠ من الثانية والخطوط التي تمثل ١/ ١٠ من الثانية تكون بارزة أما تلك التي تمثل الثانية الكاملة فمطبوعة بشكل أغلظ، وفي أعلى السجل توجد مواقع نقاط التفجير (شكل ١٢-٨)، وعلى جانب من القطاع هناك عدد من المعلومات التي تتعلق بالخطوط السيزمية وكيفية اكتساب المعلومات ومعالجتها وطريقة إظهارها، وإضافة إلى ذلك فهناك ما يعرف بخريطة الأساس base map لنقاط التفجير ومواقعها الفعلية (شكل ١٢-٩)، ويقاس العمق إلى السطح العاكس على السجل السيزمي بالملي ثانية millisecond وهي تمثل ١/ ١٠٠٠ من الثانية، ونظراً لأن الموجة الصوتية تنتقل مرتين من نقطة التفجير إلى أن تنعكس وتعود إلى السطح فإن الزمن المقاس على السجل السيزمي هو زمن ثنائي المسلك two-way time وبالطبع فكلما كان السطح العاكس عميقاً كان هذا الزمن طويلاً.

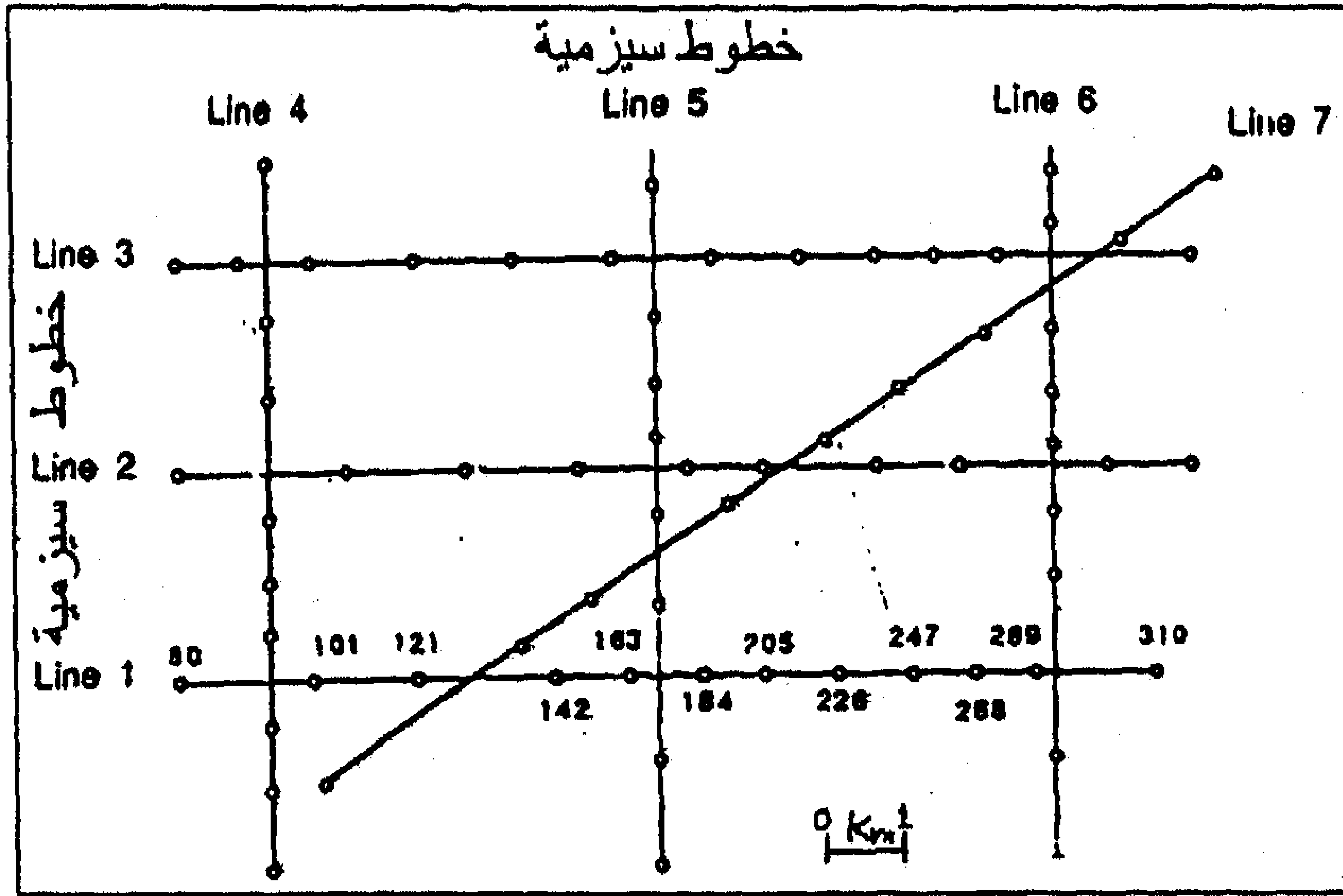
(أ) نموذج للسجل السيزمي



(ب) قطاع سيزمي حقيقي

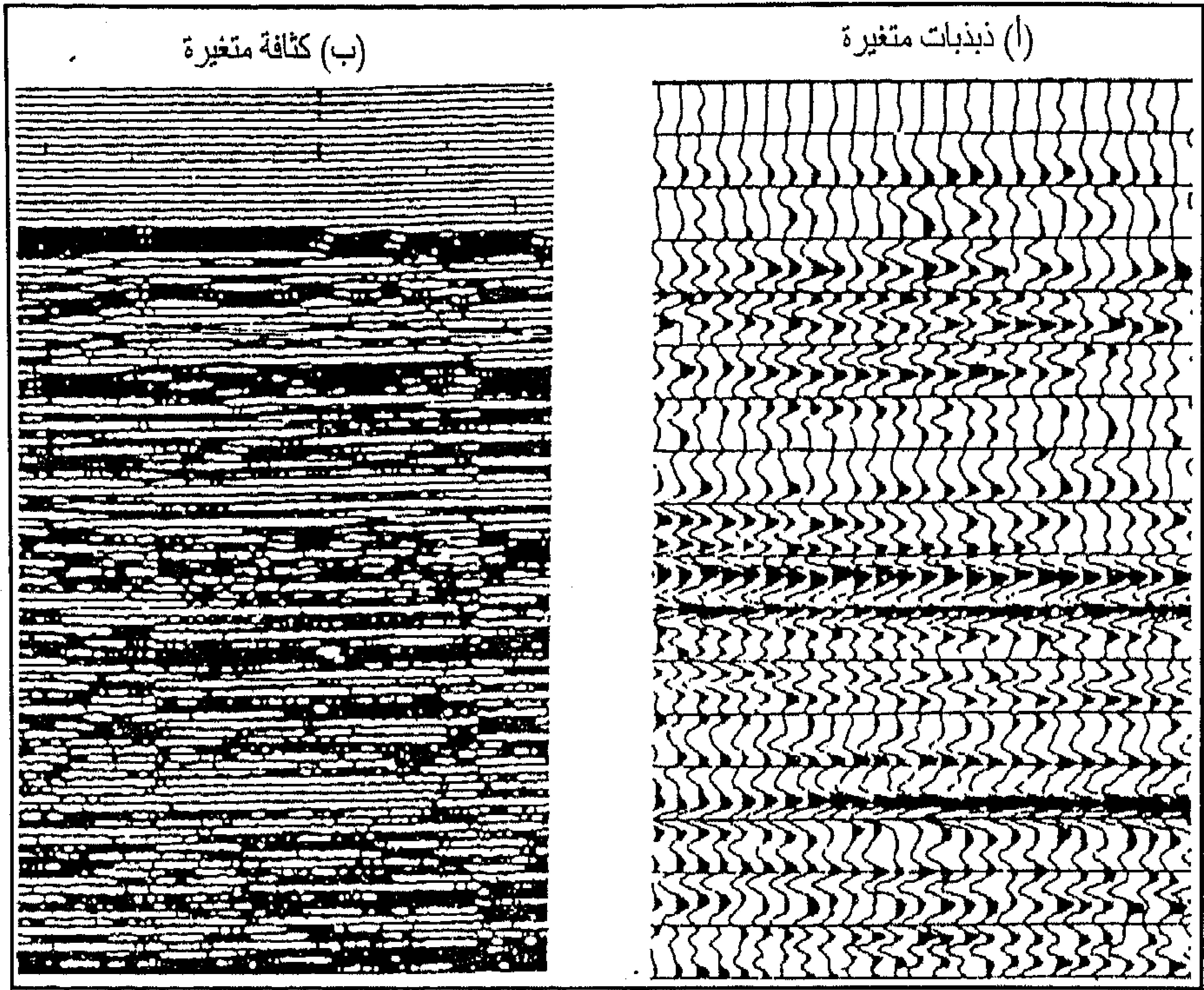


شكل ١٢-٨: السجل السيزمي.



شكل ١٢-٩: خريطة أساس لمسح سيزمي.

ويتم تسجيل المعطيات السيزمية بطرق ثلاث: تعرف الأولى بطريقة الذبذبات المتغيرة variable area wiggle trace والتي تستخدم فيها خطوط رأسية ذات ذبذبات إلى اليمين أو إلى اليسار مسجلة للاهتزازات الأرضية التي حدثت (شكل ١٢-١٠أ)، وإذا كانت الذبذبات إلى اليمين فهذا يعني انعكاسات تحتسطحية (حيث سجل الجيوفون حركة إلى أعلى) وتظلل الذبذبات باللون الأسود، أما إذا كانت الذبذبات إلى اليسار (فيعني أن الجيوفون سجل حركة إلى أسفل) وتترك الذبذبات فارغة (بيضاء)، والطريقة الثانية تعرف بالكثافه المتغيرة variable density display وتستخدم فيها الظلال الرمادية ممثلة لسعة الموجة الصوتية وكلما كان الظل داكناً فهذا يعني انعكاسات قوية (شكل ١٢-١٤ب)، أما الطريقة الثالثة فهي العروض الملونة coloured display والتي شاعت في الوقت الحاضر حيث يسهل للعين البشرية التعامل معها بسهولة ووضوح والتعرف على المزيد من المعلومات.



شكل ١٢-١٠: كيفية تسجيل المعطيات السيزمية.

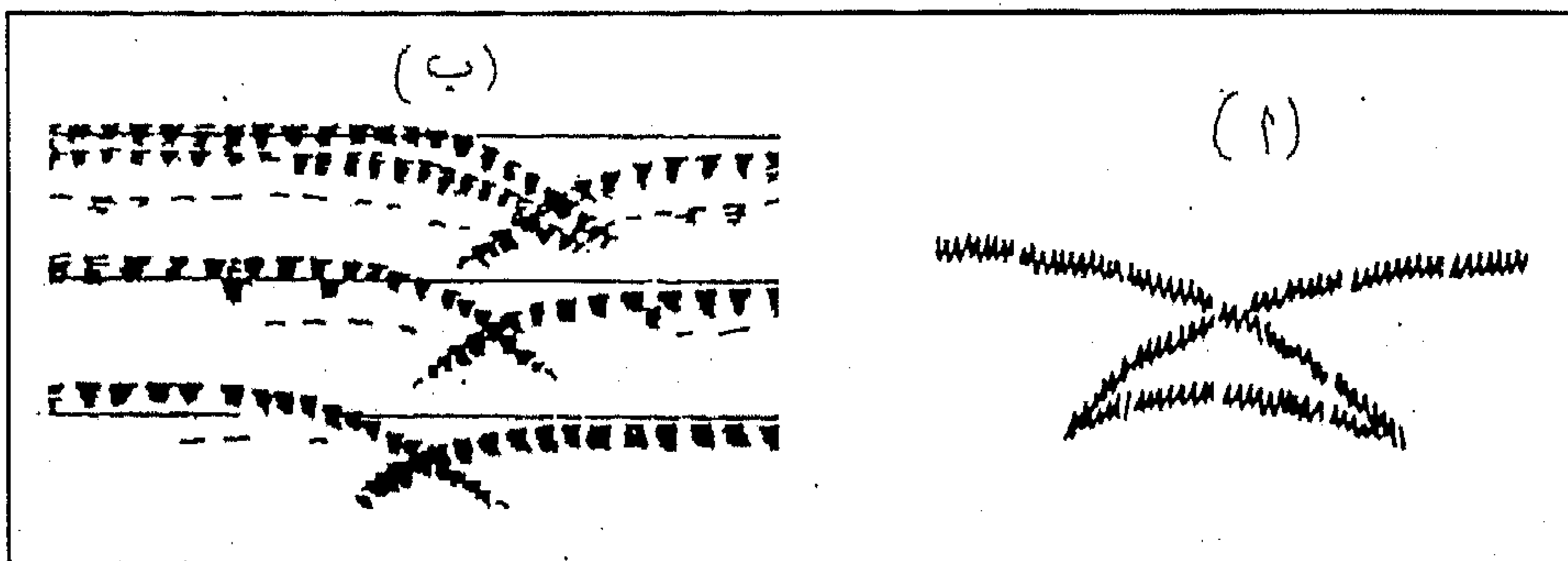
• **معالجة المعطيات:**

بعد اكتساب acquisition المعطيات السيزمية تأتي المعالجة processing وهي عملية تهدف إلى تحويل البيانات المسجلة عن البحث إلى صور تسهل التفسير الجيولوجي بأقصى درجة، وتحول المعطيات الأولية التي تم تسجيلها على هيئة رقمية digital أو تناظرية analogical في مركز المعالجة إلى قطاع تسجيلي مصحح يمكن مقارنته بوسيلة أو أخرى بالقطاع الجيولوجي التركيبي، وأحد أهداف المعالجة هو إزالة أو على أقل تقدير تقليص التشويش (الضوضاء)، وهدف آخر هو تمثيل الانعكاسات على القطاعات التسجيلية بأفضل تحليل ممكن. وتشمل المعالجة الترشيح والتصحيح والتكديس والتجميع وفك الاحتواء وتحليل السرعة وتسجيل السعة الحقيقية والارتحال والرسم البياني وجميعها عمليات معقدة ذات مصطلحات فنية يقتضي تخصيص مساحة مستفيضة تخرج عن نطاق هذا الكتاب ويمكن الرجوع إلى المراجع المتخصصة في الاستكشاف السيزمي.

إن الأثر الأكبر للحاسب الإلكتروني (الحاسوب) بعد الاستكشاف السيزمي يكمن في معالجة المعطيات الحقيقية، وبداية مثل هذه المعالجة كانت عندما أدخلت النظم الحقلية في أوائل خمسينيات القرن الماضي من أجل استعادة التسجيل على شريط مغناطيسي تناظري، ولكنها لم تكن كذلك حتى ظهور الحاسبات الرقمية ذات السرعات العالية حيث يمكن تحقيق الجهد الكامل لأساليب المعالجة من أجل الارتقاء بالجودة والاستفادة من معطيات الحقل السيزمية. وبالطبع فإن تسجيل المعطيات السيزمية على الحاسوب ومعالجة هذه المعطيات قد أدى إلى تحسن كبير في دقتها وكذا تعظيم الفائدة الكبيرة للاستكشاف السيزمي، ويجري في هذا الشأن تصحيح للمعطيات السيزمية بسبب التغير في الارتفاعات أثناء إجراء المسح الحقلي، وكذلك بالنسبة لسمك وسرعة انتقال الموجات الصوتية داخل الرواسب السطحية التي تتأثر بعمليات التجوية وتعرف بانخفاض السرعات السيزمية خلالها low-velocity layer كذلك فإنه عندما تنتقل الموجة الصوتية داخل الصخور التحتسطحية فإنها تفقد جزءًا من طاقتها، لذا فإن عملية فك الإحتواء deconvolution التي يتم إجراؤها عن طريق الحاسوب تهدف إلى ضغط واستعادة الانعكاسات التحتسطحية المسجلة لكي تصبح مشابهة للنبضات الأولى للطاقة السيزمية المنطلقة، مما يقوي من هذه الانعكاسات ويقلص الكثير من التشويش.

ومن ناحية أخرى فإن القطاع السيزمي يكون دقيقاً عندما تكون الآفاق العاكسة أفقية ومستوية أما إذا كانت الطبقات مائلة فسوف يختلف مسار الطاقة السيزمية من نقطة التفجير إلى موقع المقياس عما إذا كانت الطبقات أفقية عند نفس الموقع، لذا فإن الطبقات المائلة لا تظهر على السجل السيزمي في موضعها الحقيقي ولكن تبدو مرتحلة أسفل الميل وأكثر تسطحاً، وهذا التأثير يجعل الطيات المحدبة تبدو أكبر من حجمها، وعلى النقيض بالنسبة للطيات المقعرة التي تكون أقل من حجمها الفعلي، وهذا من شأنه أن يسبب للطبقات العميقة والشديدة الميل أن تتقاطع مكونة ما يعرف بالربط المقوس bow tie (شكل١٢-١١أ). كما أن الطبقات التي تنتهي أمام الصدع تبدو كأنها تتقاطع مع الطبقات الصخرية على الجانب الآخر من الصدع (شكل ١٢-١١ب)، ومن ثم كانت هناك عملية للمعالجة باستخدام الحاسوب تعرف بالارتحال migration تقوم على تحريك الطبقات المائلة إلى موقع أكثر دقة على السجل السيزمي. كذلك فهناك الكثير من الأحواض

الترسيبية في مناطق العالم مثل خليج المكسيك وبحر الشمال والشرق الأوسط حيث توجد طبقات من الملح ذات امتداد واسع والتي تعمل بشكل كبير على إعاقة مرور الطاقة السيزمية إلى الطبقات التي تسفلها مما لا يتيح التعرف على التراكيب الجيولوجية التحتسطحية بالمنطقة والتي قد تكون ذات إمكانيات بترولية، وقد أمكن معالجة هذا الأمر باستخدام أسلوب على الحاسوب يعرف بالارتحال قبل التكديس pre stack migration من شأنه تقديم صورة واضحة لتلك التراكيب الجيولوجية العميقة، وكان أول كشف تحت الملح sub salt لحقل ماهوجاني Mahogany field في خليج المكسيك عام ١٩٩٣ حيث أمكن تحديد مصيدة بترولية على هيئة طية محدبة كما يقع خزان الحجر الرملي عند عمق ٥٦٠٠ متر، أما طبقة الملح فهي الأعلى عند عمق ٤٥٠٠ متر.



شكل ١٢-١١ : أحداث سيزمية غير مرتحلة (أ) ربط مقوس نتيجة طية مقعرة عميقة وشديدة الميل.

(ب) أحداث متقاطعة لوجود صدع بالمنطقة.

وفي العمل الحقلي عادة ما تمد الخطوط السيزمية بحيث تتقاطع وتترابط tie-in مما يجعل في الإمكان مضاهات الانعكاسات من قطاع سيزمي إلى آخر، أما إذا كانت هذه الانعكاسات لا تتضاهي فهذا يعني أن النتائج قد أخفقت في ذلك الربط miss-tie.

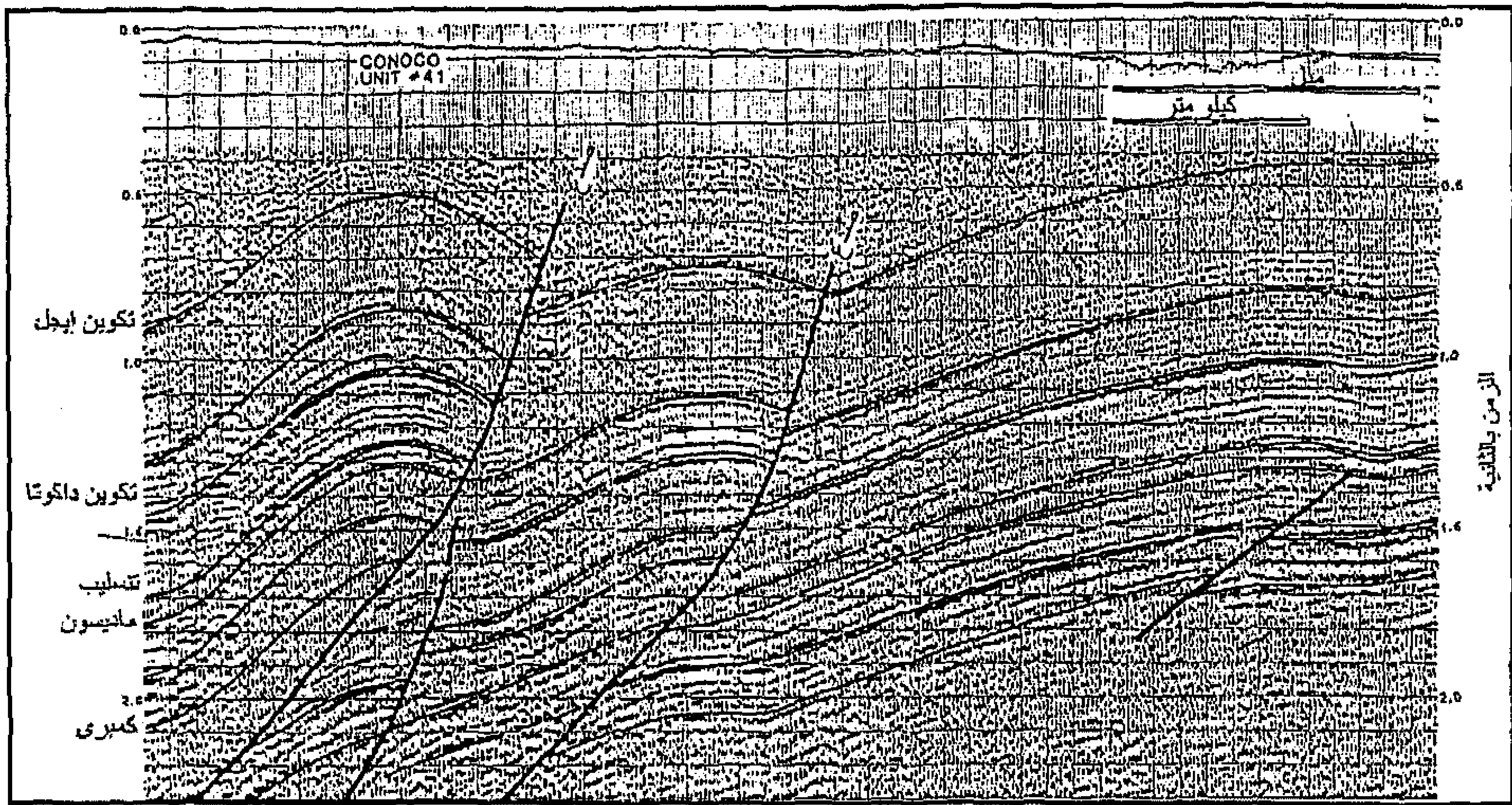
ومن حيث المبدأ فإن السجل السيزمي يوضح التراكيب الجيولوجية التحتسطحية، كما أن بإمكانه تعيين الصخور الرسوبية من واقع تميزها الطبقي لكنه لا يحدد نوع الطبقات الرسوبية منفردة إلا في بعض الحالات، وبالطبع فإن السجل السيزمي يمكن أن يكون أكثر فائدة إذا ما أمكن تحديد أنواع الطبقات الصخرية وكذا الخزانات الجوفية وما يعلوها من صخور مانعة، ولكي يتم ذلك غالباً ما يمر الخط السيزمي بإحدى الآبار التي سبق حفرها، وبالطبع فإن التسجيلات البتروفيزيائية التي أجريت في هذه البئر ستساعد

السجل السيزمي في هذا الأمر، وفي حالة عدم وجود بئر هناك يمكن حفر بئر اختبارية بهدف جمع المعلومات التحتسطحية وربطها بالقطاع السيزمي وهو ما سوف يساعد على تحديد عمر وتركيب الانعكاسات الصوتية ووضعها على البروفيل السيزمي. وإضافة إلى ذلك هناك ما يعرف باعادة المعالجة reprocessing بواسطة الحاسوب للتحقق من فاعلية المعطيات السيزمية ومصداقيتها، كما تمت في عدد من الحالات هذه الإعادة على معطيات سيزمية قديمة كانت مسجلة على الحاسب الرقمي أو على الشرائط الممغنطة وأدت إلى اكتشاف حقول بترولية جديدة لم تكن التقنيات السائدة آنذاك قادرة على إماطة اللثام عنها، وتجدر الإشارة إلى أنه ما زال هناك العديد من المعطيات السيزمية التي تعتبر ذات ملكية خاصة proprietary ولم يتم الإفراج عنها نظراً لأهميتها الاقتصادية، كما أن هناك السماسرة brokers الذين يزاولون عملية البيع والشراء لهذه المعطيات في عدد من بلدان العالم بغية جمع الثروات والمضاربة.

- **تفسير المعطيات:**

بعد اكتساب بيانات المسح السيزمي ومعالجتها يأتي دور العمل لتفسير interpretation وترجمة هذه البيانات إلى مصطلحات جيولوجية وتأويلها والتعرف على الصور الجيولوجية والمعالم التركيبية والتطبقية لما تحت السطح، ويعرف الأفق السيزمي seismic horizon بأنه ذلك الإنعكاس الذي يمكن تتبعه عبر القطاع السيزمي حيث تظهر الصخور الرسوبية على هيئة طبقات، كما أن التشوهات الصخرية مثل ميول الطبقات والطيات والصدوع فإنه يمكن تحديدها بجلاء على السجل السيزمي، والشكل ١٢-١٢ يمثل قطاعاً سيزمياً بإحدى المناطق حيث يظهر عدد من الطيات والصدوع الدسرة والمعكوسة، أما المساحات السيزمية التي لا تدل على انعكاسات متواصلة وذات نمط محدد فهي تميز صخور القاعدة، كما أن قباب الملح والشعاب المرجانية لا تبين وجود عاكس ذي هيئة طبقية، فقبة الملح تظهر في القطاع السيزمي في هيئة سدادة غير طبقية، كما أن حوافها تتحدد بوجود صخور رسوبية منتهية الامتداد ومسحوبة إلى أعلى راجع شكل ٨-٢٥، أما الشعب المرجانية فتبدو على هيئة كومة مجمعة. وبجانب القطاعات السيزمية هناك الخرائط الكنتورية والتي يتم رسمها في البداية باستخدام الوحدات الزمنية (الثانية)، وتشبه الخريطة التركيبية السيزمية (ملي ثانية) الخريطة التركيبية التي تستخدام وحدات العمق (المتر أو القدم) وتسمى الخريطة السيزمية في هذه الحالة والتي

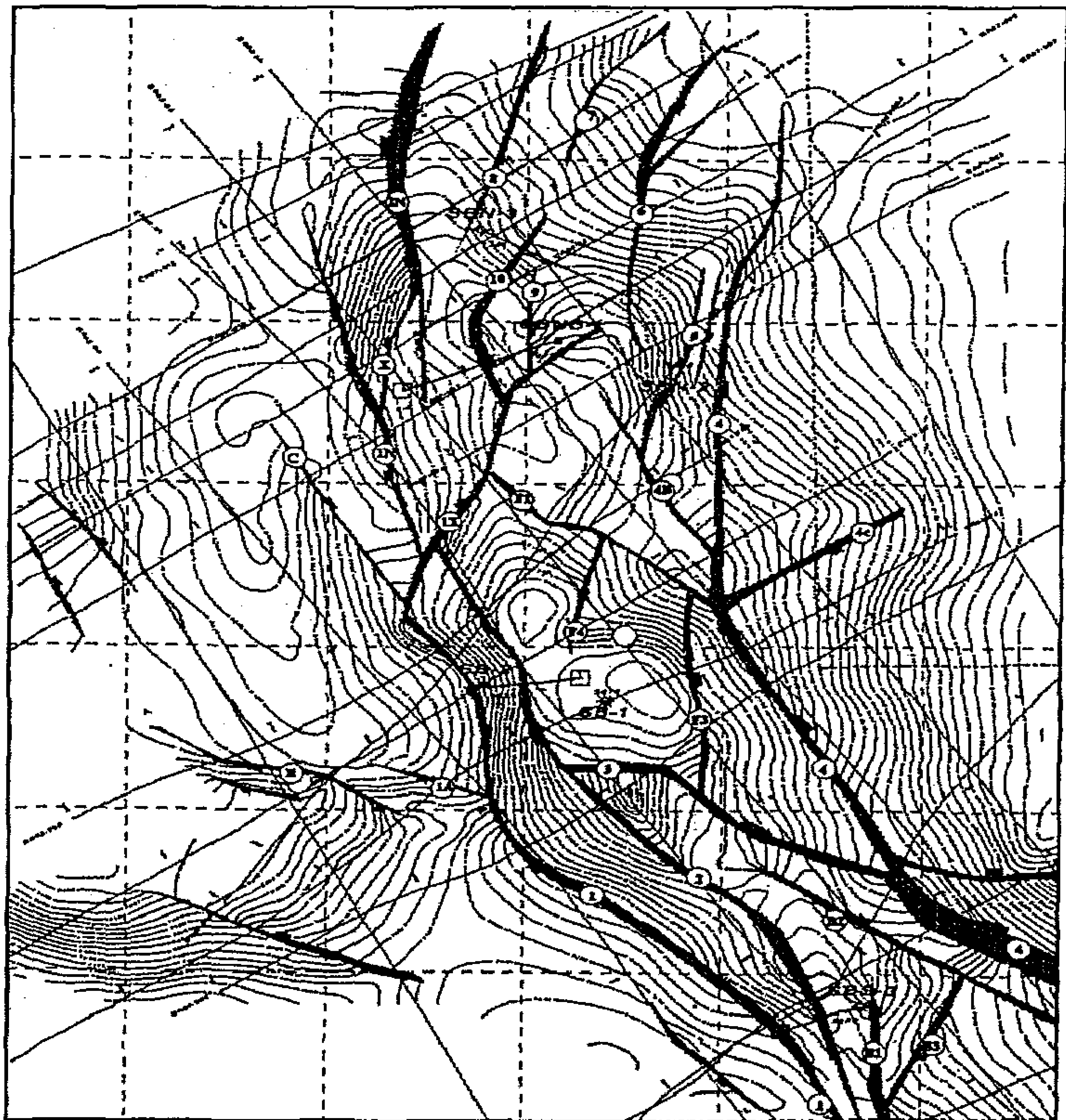
تمثل سطحاً عاكساً معيناً بخريطة الزمن isotime or isochron map، أما الخريطة السيزمية التي تمثل المسافة الزمنية بين سطحين سيزميين فتسمى خريطة المسافة الزمنية time interval map وتشبه فكرتها خريطة السمك isopach map المستنبطة من معطيات الآبار، وإذا ما عرفت السرعات السيزمية داخل طبقة ما فإنه يمكن من خريطة الزمن رسم خريطة تركيبية أو خريطة السمك لطبقة معينة، وإذا ما أريد رسم خريطة تركيبية كنتورية على سطح معين فإنه يلزم تحويل المعطيات السيزمية من وحدة القياس المسجل بها (الثانية) إلى وحدة الأطوال (قدم أو متر) إذا ما أمكن معرفة سرعة انتقال الموجات الصوتية داخل الطبقة الصخرية، حيث يتناسب الزمن تناسباً عكسياً مع السرعة.



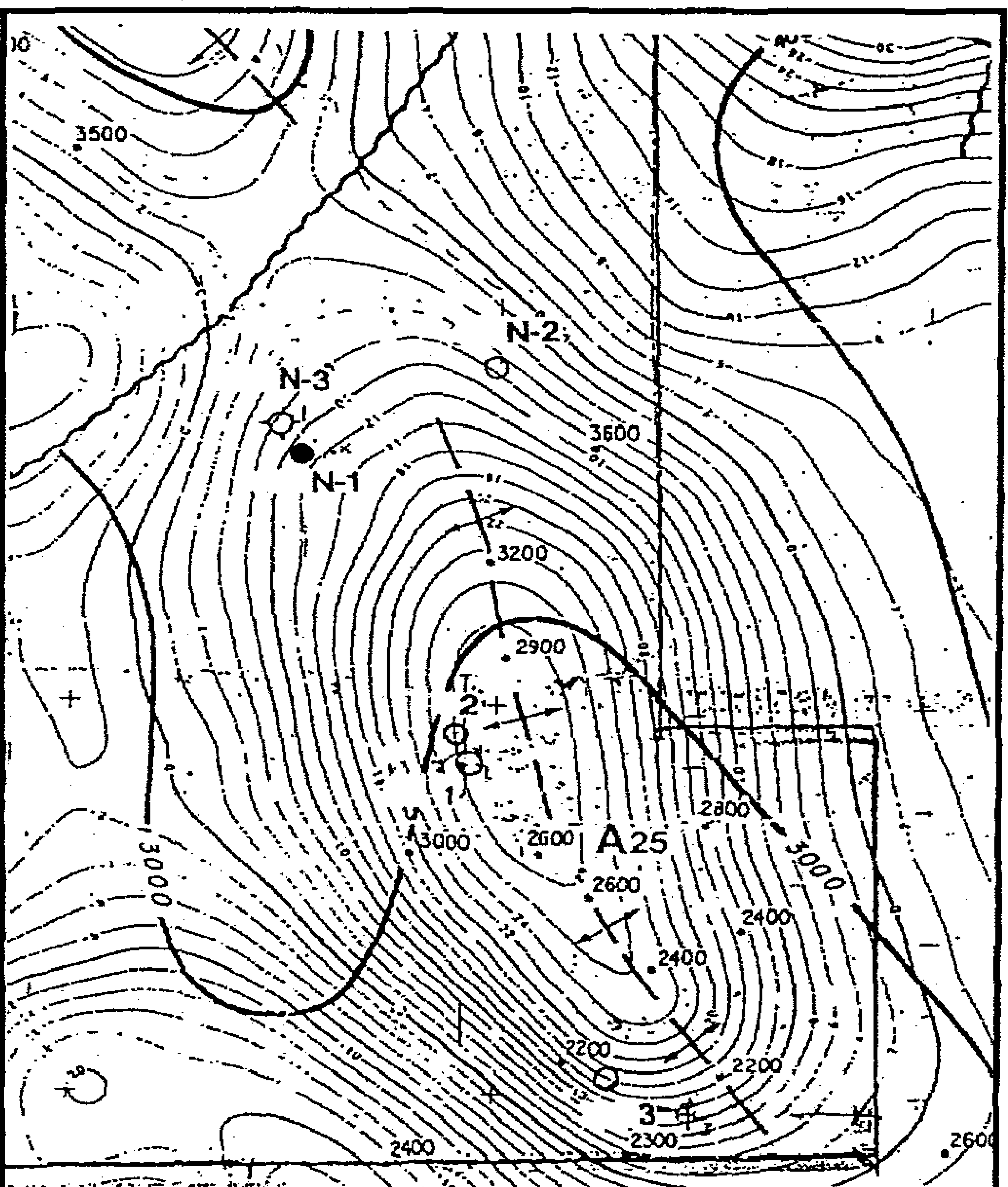
شكل ١٢-١٢: قطاع سيزمي يوضح وجود عدد من الطيات المحدبة والصدوع الدسرة والمعكوسة.

ويبرز الشكل ١٢-١٣أ أهمية المسح السيزمي في العمل الاستكشافي مقارنة بالطرق الجيوفيزيائية الأخرى (جاذبية، مغناطيسية) والذي يمثل خريطة سيزمية على صخور القاعدة بإحدى المناطق في خليج السويس حيث تكشف هذه الخريطة عن وجود تركيب جيولوجي على هيئة طية محدبة يقطعها عدد من الصدوع، وكانت المنطقة قد سبق مسحها باستخدام المسح المغناطيسي الجوي (شكل ١٢-١٣ب) حيث أظهرت النتائج وجود هذه الطية ولكن دون تلك التفاصيل التي حددتها الخريطة السيزمية. هذا وقد تأكد العثور على احتياطيات بترولية كبيرة بالمنطقة بناء على تلك النتائج.

المسح السيزمي



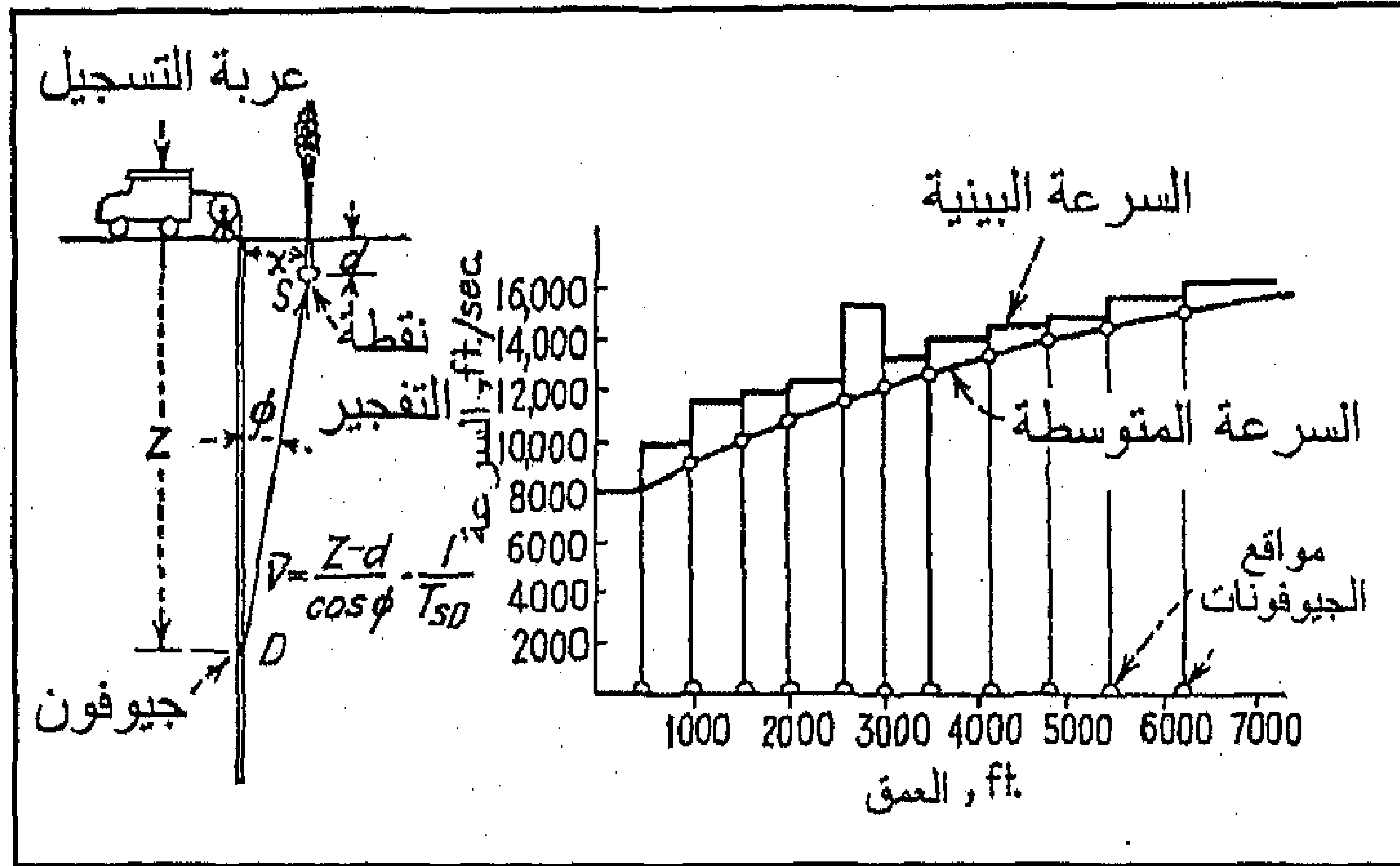
المسح المغناطيسي



شكل ١٢-١٣: مقارنة بين خريطتين إحداهما من المسح المغناطيسي الجوي والأخرى من المسح السيزمي ثلاثي الأبعاد لنفس المنطقة حيث يتبين بجلاء كفاءة وقدرة المسح السيزمي في تحديد التراكيب الجيولوجية بشكل مفصل بما في ذلك الصدوع التي تعترضها.

ولتحويل المعطيات الزمنية في المسح السيزمي إلى وحدات الطول (العمق في هذه الحالة) لابد من معرفة السرعة المتوسطة للموجات الصوتية داخل الطبقات في منطقة البحث، ولهذا الغرض هناك عدد من الطرائق التي يمكن استخدامها على النحو التالي:

- طلقة المراجعة check shot وتتلخص هذه الطريقة في إنزال جيوفون داخل البئر المراد إجراء القياسات بها حيث يتم تفجير shooting مصدر سيزمي (ديناميت مثلاً) في بئر ضحلة أو حفرة بالقرب من البئر العميقة وتسجيل الزمن الذي استغرقته الموجة الصوتية للوصول إلى الجيوفون (شكل ١٢-١٤)، ويتم تكرار ذلك على أعماق مختلفة، وتكون السرعة البينية interval velocity هي المسافة بين عمقين متتاليين مقسومة على الفرق بين زمني الوصول عند هذين العمقين وذلك بعد إجراء تصحيح بسيط بسبب المسار المائل للموجة الصوتية من المصدر السيزمي إلى الجيوفون، أما السرعة المتوسطة average velocity فتكون مساوية للمسافة الرأسية الكلية مقسومة على الزمن الكلي للقياس.

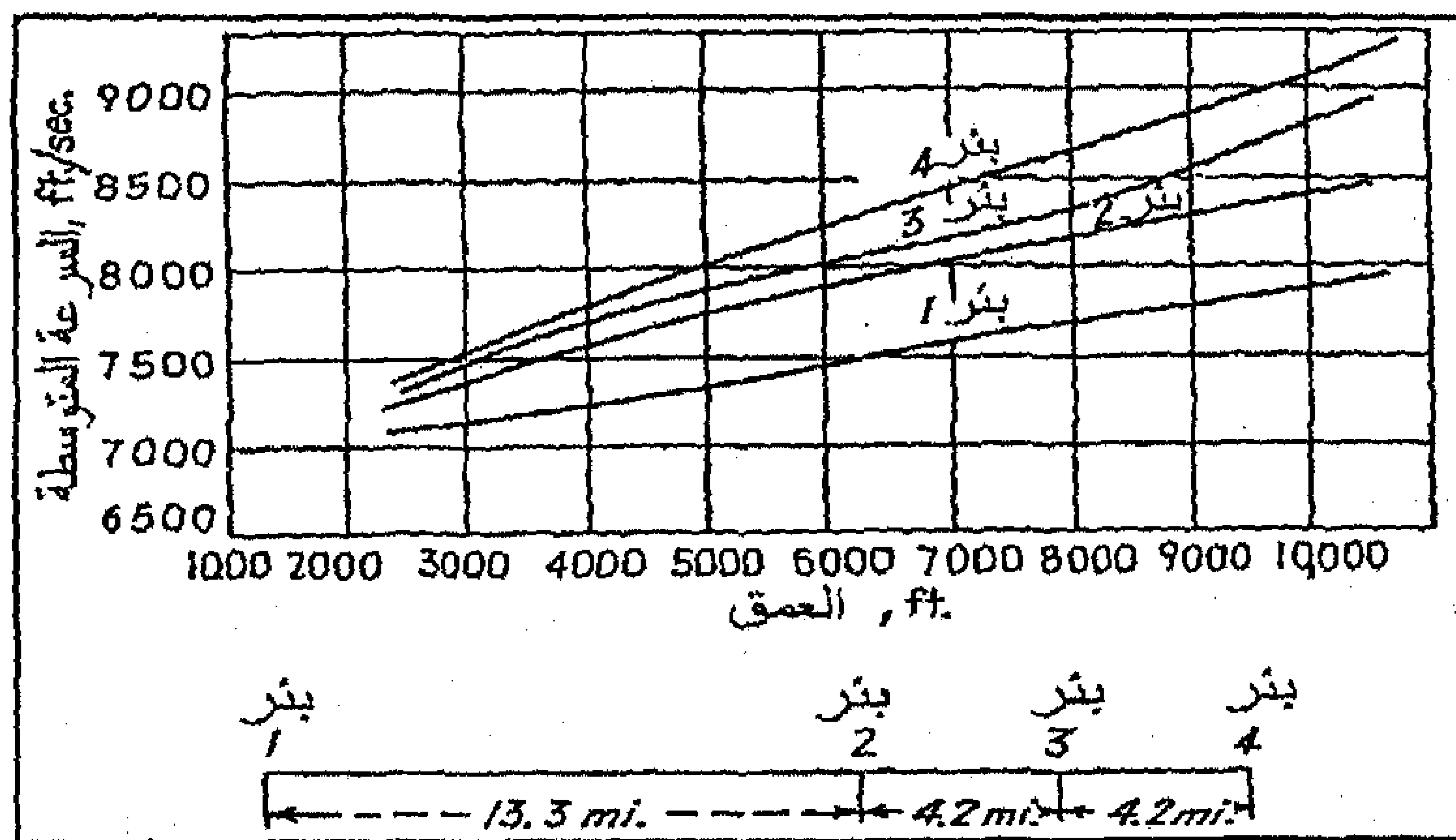


شكل ١٢-١٤: تفجير الآبار وقياسات سرعة الموجات الصوتية.

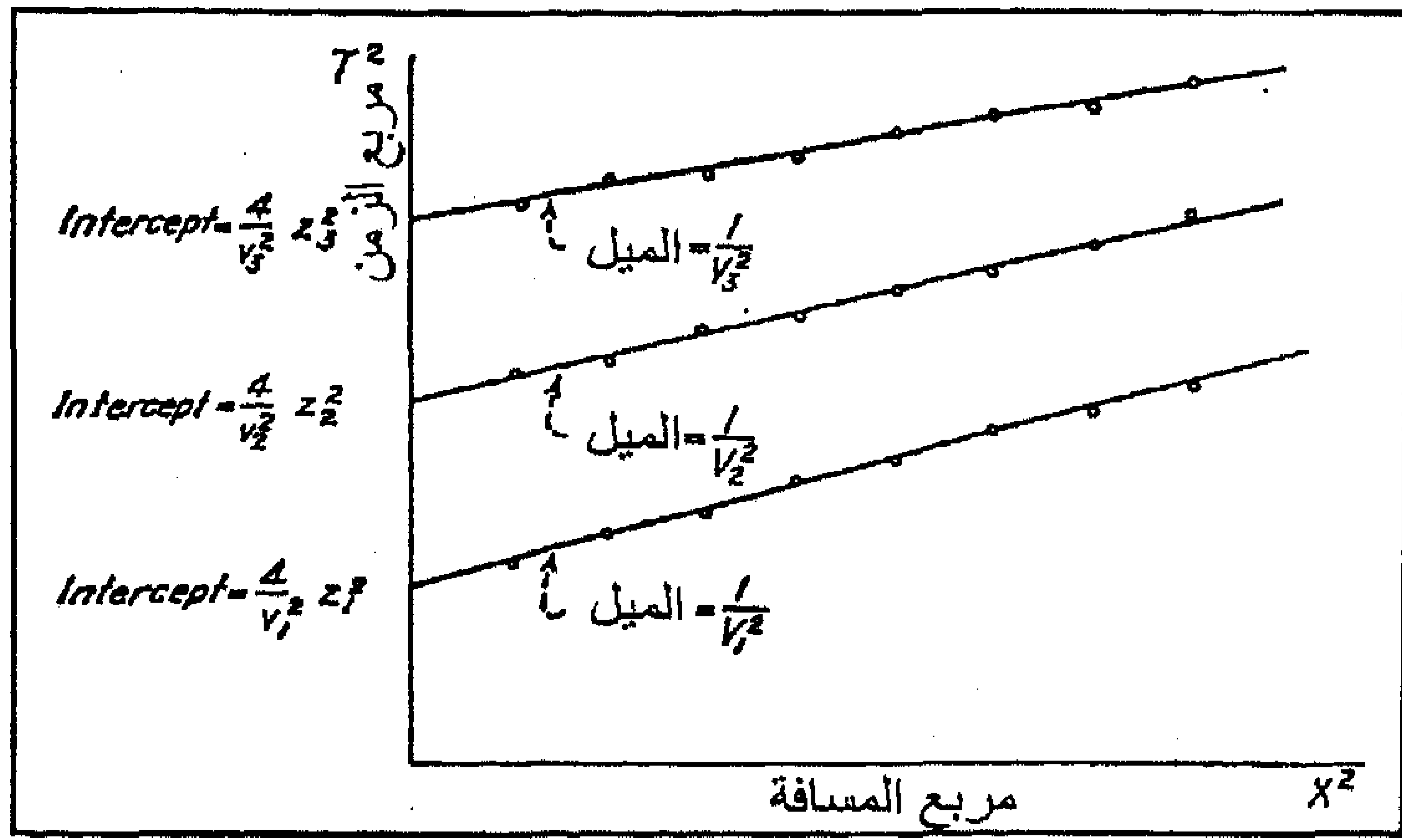
- البروفيل الرأسي السيزمي velocity seismic profiling (VSP) وهي تشبه الطريقة الأولى فيما عدا أن المسافة الجيوفونية أقصر (ما بين ١٥ إلى ٣٠ متراً) بدلاً من ٥٠ أو ١٥٠ أو ٣٠٠ متر في الطريقة الأولى، وبالطبع فإن النتائج المحصلة من الطريقة الثانية تكون أكثر دقة.

• بالإضافة إلى الطريقتين السابقتين هناك تسجيل السرعة المتواصلة داخل الآبار continuous velocity logs والتي ترصد التغير في هذه السرعة مع العمق في صورة سجل متواصل على امتداد البئر (شكل ١٢-١٥).

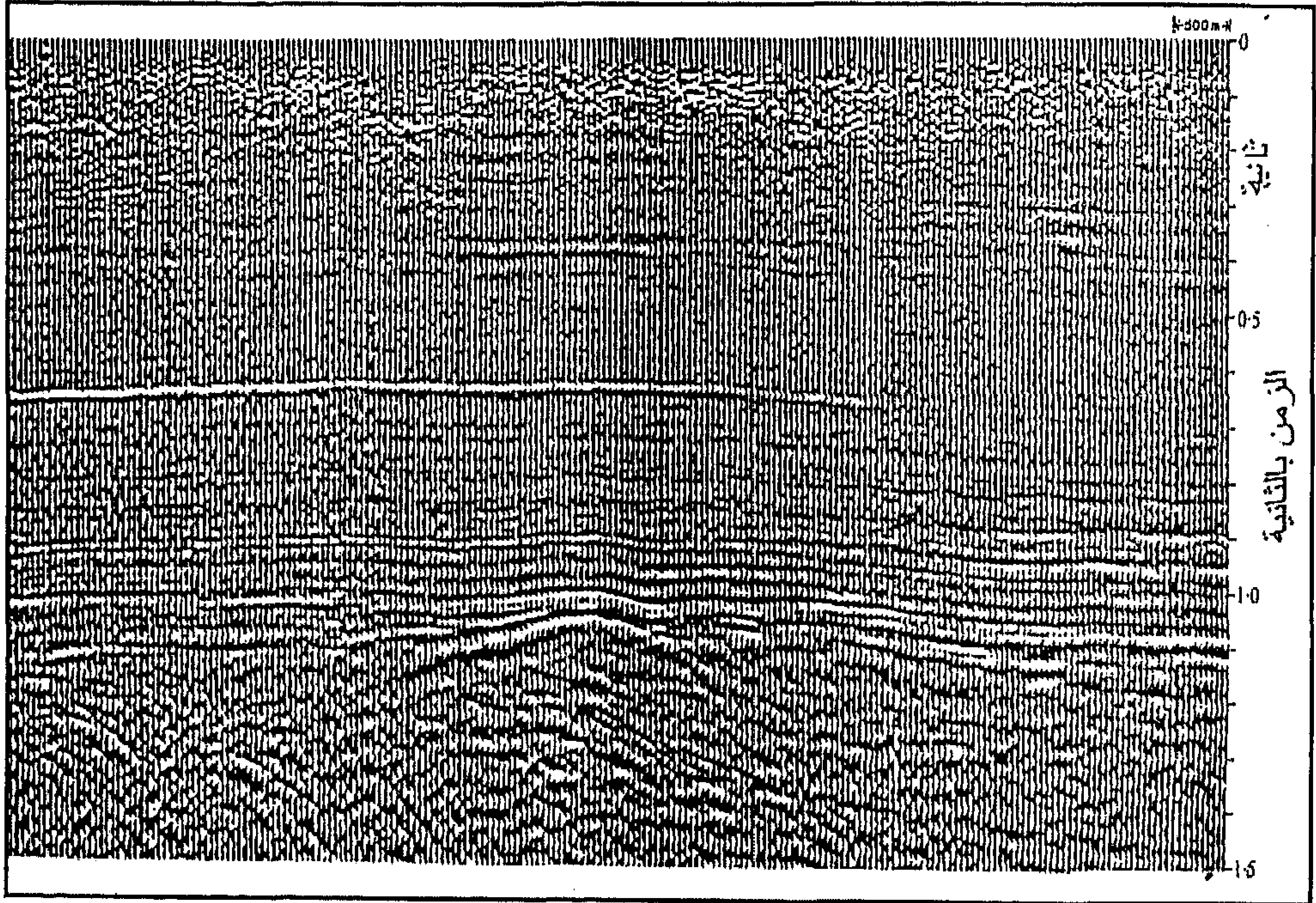
• هناك أيضاً الطريقة التحليلية analytical من واقع الانعكاسات السيزمية الصادرة من آفاق سيزمية موجودة عند أعماق مختلفة وتحديد السرعة عن طريق ذلك بيانياً (شكل ١٢-١٦). وتتوقف سعة الموجة السيزمية المنعكسة على سطح ما على مدى التباين في الخصائص بين الطبقة الأعلى والطبقة الأسفل اللتين تكونان هذا السطح وهو ما يعرف بالمعاوقة الصوتية acoustic impedance التي تساوي حاصل ضرب السرعة في الكثافة، وكلما كانت قيمة المعاوقة كبيرة تعاظمت الانعكاسات واشتدت، كما تعرف نسبة الطاقة السيزمية المنعكسة بمعامل الانعكاس reflection coefficient وهي في الطبقات الرسوبية ضئيلة نسبياً وتتراوح عادة بين ٢٪ و٤٪ وفي وجود الغاز تكون سرعة الموجات الصوتية ضئيلة للغاية وهذا ما يلاحظ في حالة الخزانات الجوفية الحاملة للغاز، وإذا كان صخر الخزان يعلوه صخر غير منفذ فإن التباين في المعاوقة الصوتية سوف ينتج عنه صدى يقدر بحوالي ١٦٪ من حجم الطاقة السيزمية مولداً بذلك ما يعرف بالبقعة الناصعة bright spot والتي تبدو على القطاع السيزمي كما لو كان هناك سطح عاكس قوي (شكل ١٢-١٧)، وتستخدم هذه البقع في تحديد مواقع تجمعات الغاز وكذلك في تحديد غطاء الغاز الذي قد يوجد فوق التجمع الزيتي الذي يسفله، ولا يرتبط وجود البقع الناصعة بالقيمة الاقتصادية للكشف.



شكل ١٢-١٥: التسجيلات المتواصلة لسرعة الموجات الصوتية في الآبار.



شكل ١٢-١٦: تعيين السرعات الصوتية المتوسطة في تحاليل الانعكاسات السيزمية.



شكل ١٢-١٧: قطاع سيزمي يوضح البقعة الناصعة الدالة على وجود الغاز بالمنطقة أسفل ٠،٦ ثانية، أما صخور القاعة فتبدو عند ١،١ ثانية تقريباً.

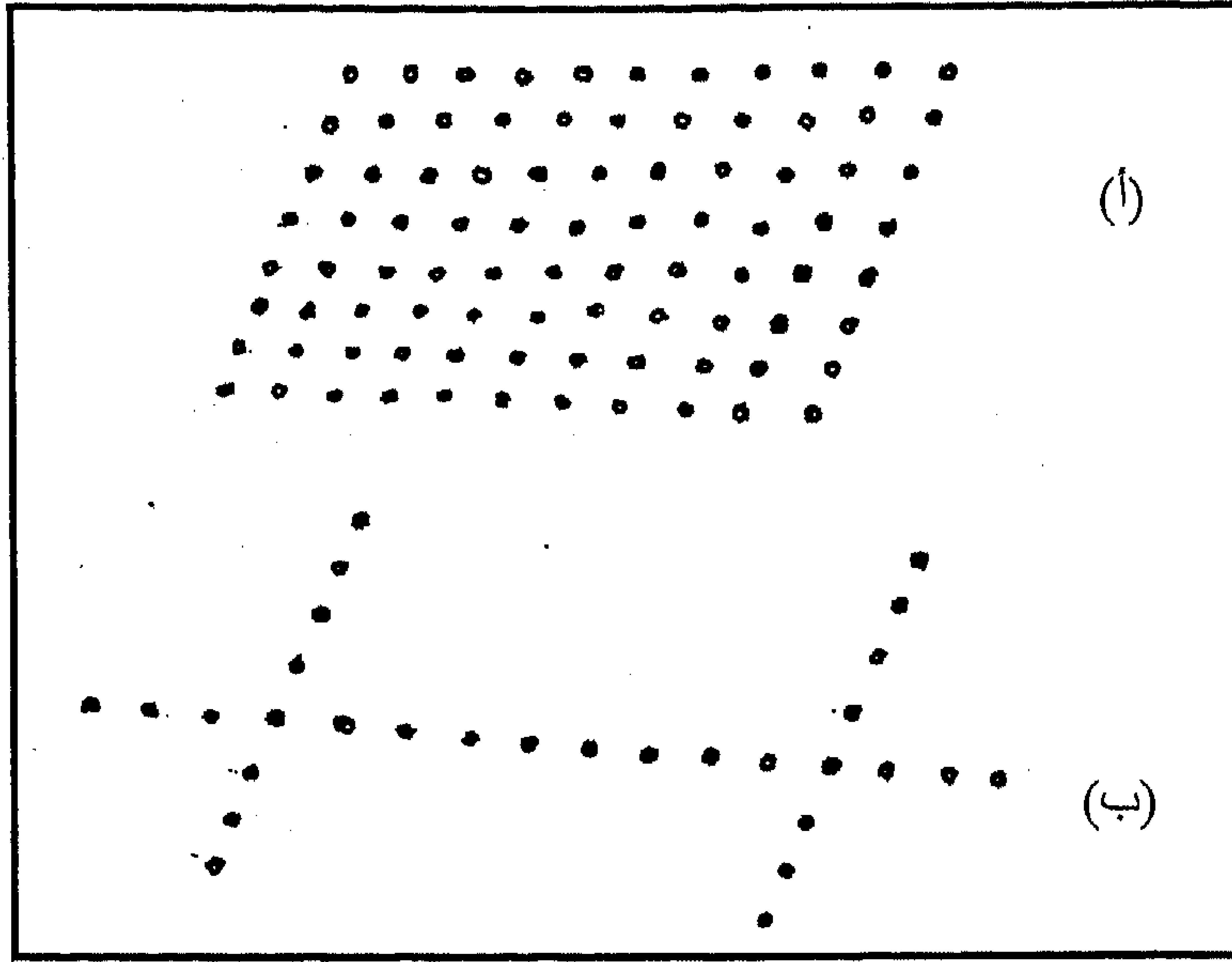
وإضافة إلى البقع الناصعة هناك أيضاً البقع المعتمة dim spots التي تظهر فيها سعة الموجات المنعكسة ضئيلة كما قد يحدث أحياناً بالنسبة لبعض الشِّعب.

ويعتبر أسلوب تحليل المعطيات والتعرف على سعة الموجة السيزمية مقابل بُعد المسافة بين نقطة التفجير والجيوفون(amplitude versus offset (AVO من الأساليب المستخدمة في العمل السيزمي ومعالجة البيانات عن طريق البرمجيات ويسعى هذا الأسلوب أساساً لتحديد الطبقات الحاملة للغاز وأيضاً للتعرف على طبيعة الطبقات الصخرية فإذا ما ازدادت سعة الموجة مع ازدياد المسافة المعينة ينتج عن ذلك البقع الناصعة على القطاع السيزمي ويكون دليلاً على وجود خزان جوفي مشبع بالغاز، أما إذا تناقصت هذه السعة مع ازدياد المسافة المعنية فهذا يشير إلى وجود خزان كربوناتي.

وعند تفسير المعطيات السيزمية هناك السيزموجرام الاصطناعي synthetic seismogram وهو سجل مستنبط بواسطة الحاسب الآلي من الإنعكاسات المحسوبة من المعاوقة الصوتية حيث تجري مقارنته بالقطاع السيزمي الفعلي مما يساعد بالتالي على تحديد الطبقات الصخرية المختلفة ومضاهات الأحداث السيزمية وتفسيرها.

الاستكشاف السيزمي ثلاثي الأبعاد:

في العمل الحقلي وحتى وقت قريب كان الاستكشاف السيزمي الثنائي الأبعاد 2-D seismic هو السائد وربما كان الأسلوب الوحيد، ولكن خلال الثمانينات والتسعينيات من القرن الماضي بدأ تقديم الاستكشاف السيزمي ثلاثي الأبعاد 3-D seismic بدلاً من ذي البعدين وكانت البداية محاطة بكثير من التحفظ بسبب التكلفة المرتفعة وعدم الجزم آنذاك بفاعلية هذه التقنية الجديدة، لكن الشجاعة في اتخاذ القرار وإقدام عدد من الشركات العاملة على اختبار هذه التقنية كان لها الأثر في إبراز وتأكيد أهمية هذا الحدث الجديد في مجال الاستكشاف والعثور على احتياطيات بترولية إضافية وكان حجم الاستثمار في النشاط السيزمي في عام ١٩٩٣ قد بلغ ما يقرب من خمسة بلايين دولار. ويجري المسح السيزمي ثلاثي الأبعاد على أساس الكيلومتر المربع باستخدام شبكة كثيفة من الخطوط السيزمية التي تتباعد فيما بينها بحوالي ٥٠ متراً أو أقل مما ينتج تفصيلاً وكفاءة أعلى في رسم باطن الأرض بينما تتباعد الخطوط السيزمية عن بعضها كثيراً (كيلو متر أو أكثر) عند إجراء المسح السيزمي ثنائي الأبعاد وتقل كثافاتها مما يؤثر على دقة النتائج وجودتها (شكل ١٢-١٨).



شكل ١٢-١٨: نمط تباعد الخطوط السيزمية في (أ) المسح السيزمي الثلاثي الأبعاد، (ب) المسح الثنائي الأبعاد.

وبالرغم من الفائدة الكبيرة التي يقدمها المسح ثلاثي الأبعاد مقارنة بالمسح الثنائي الأبعاد فإنه ينبغي أخذ الحيطة والتروي عند التفكير في استخدام المسح الثلاثي الأبعاد وأن يكون هناك مبرر قوي لاتخاذ القرار بهذا الشأن نظراً للتكلفة العالية، حيث تبلغ تكلفة الحصول على الكيلومتر الواحد من المسح الثنائي ما يقرب من ٣- ٤ آلاف دولار، بينما تبلغ التكلفة من المسح الثلاثي ٥- ٦ آلاف دولار هذا بالاضافة إلى معالجة البيانات السيزمية حيث تقدر في المسح الثلاثي بعدة أضعاف تلك في حالة المسح الثنائي، ومع ذلك فإن كفة المسح الثلاثي ما زالت ترجح من قبل الشركات العاملة، فلو فرضنا أن حقلاً بترولياً متوسط الحجم يحتوي على مخزون يبلغ حوالي ٥٠٠ مليون برميل ويتطلب تغطيته بخطوط سيزمية (حوالي ١٦٠٠ خط كم^{٢}) فقد تصل تكلفة المسح السيزمي حوالي ١،٥ - ٢ مليون دولار أي ما يقرب من نصف تكلفة حفر بئر تقييمية أو إنهائية.

وفي مرحلة اكتساب المعطيات باستخدام المسح الثلاثي الأبعاد هناك عدة أنماط بالنسبة لأوضاع الجيوفونات ونقاط التفجير وتهدف جميعها إلى تبسيط عمليات المعالجة وارتحال الانعكاسات إلى موقع أكثر موثوقية وواقعية، كما يمكن أيضاً عرض النتائج على

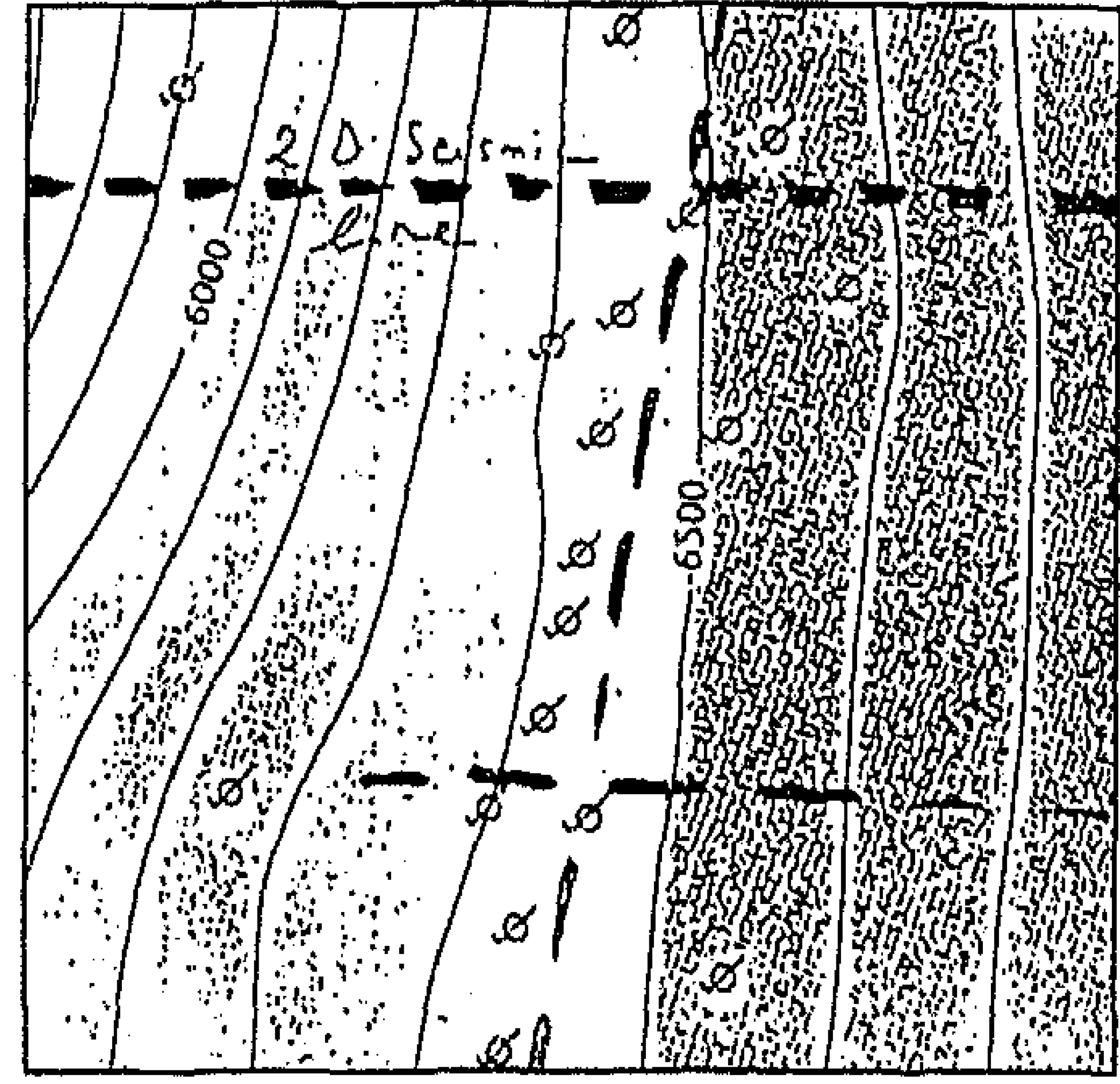
شاشات الكمبيوتر ووسائل العرض الأخرى، وأصبح ما يعرف بمكعب العرض cube display من أبرز الأساليب شيوعاً في العمل السيزمي ثلاثي الأبعاد وهو أداة لإظهار صورة السطوح العاكسة بشكل واضح وتمييزها عن السطوح الأخرى، كما أن الصورة يمكن تحريكها وإدارتها آلياً لمشاهدتها في الاتجاهات المختلفة وفي ذلك تجسيم جيد لها وهو ما لم يكن حادثاً في الماضي، ومن هذا المكعب السيزمي يمكن استخلاص شرائح للتكوينات الجيولوجية والتعرف على ما بها من معالم تركيبية كالصدوع وخلافه.

ومن الأمثلة الحقلية التي تؤكد كفاءة المسح السيزمي ثلاثي الأبعاد ما حققته شركة إكسونExxon الأمريكية عام ١٩٩٤ من حصيلة ٤٠ مسحاً أجريت في منطقتي خليج المكسيك وحوض مالاي بآسيا حيث بلغت نسبة العائدات المالية نحو ٢٨٪ووفورات بحوالي ٣٩٠ مليون دولار على النحو الآتي:

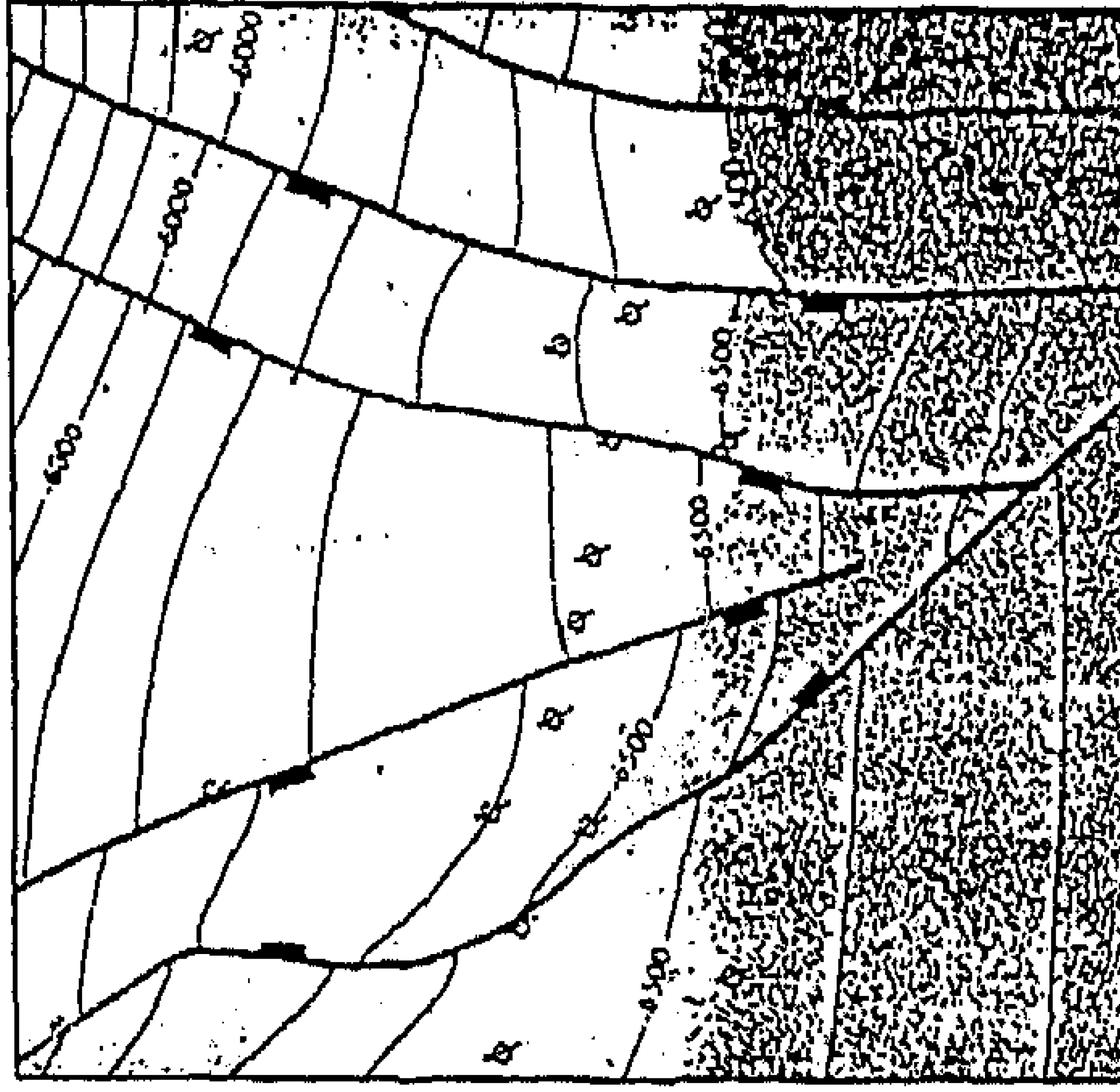
المنطقة	عدد المسوح	المصروفات (مليون دولار)	الاحتياطيات البترولية المضافة (مليون برميل)	الوفورات (مليون دولار)	الأرباح (مليون دولار)	العائد (٪)
خليج المكسيك	٣٠	٣٥	٢٦	٤٧	١٤٠	٢٢
حوض مالاي	١٠	١٣	١٠٠	٤٧	٢٥٠	٣٣

وثمة مثال آخر يوضح بجلاء كفاءة المسح الثلاثي الأبعاد في رسم صورة التركيب الجيولوجي للخزان المنتج بحقل العثمانية بالسعودية، وكان قد سبق هذا المسح مسح ثنائي الأبعاد أوضحت نتائجه وجود تركيب أحادي الميل monocline ولكن المسح الثلاثي الأبعاد الذي تم إجراؤه في فترة لاحقة كشف عن وجود العديد من الصدوع التي تعترض التركيب الجيولوجي والتي أثرت بشكل كبير على أداء الخزان الجوفي (نطاق العرب D) ونمط انسياب الموائع بداخله، الأمر الذي استلزم بناء نمط محاكاة جديد لهذا الخزان كمرجع رئيس في إدارة الخزان وتنمية الحقل على الوجه الأكمل والحصول على العائد المرجو (شكل ١٢-١٩).

(أ)



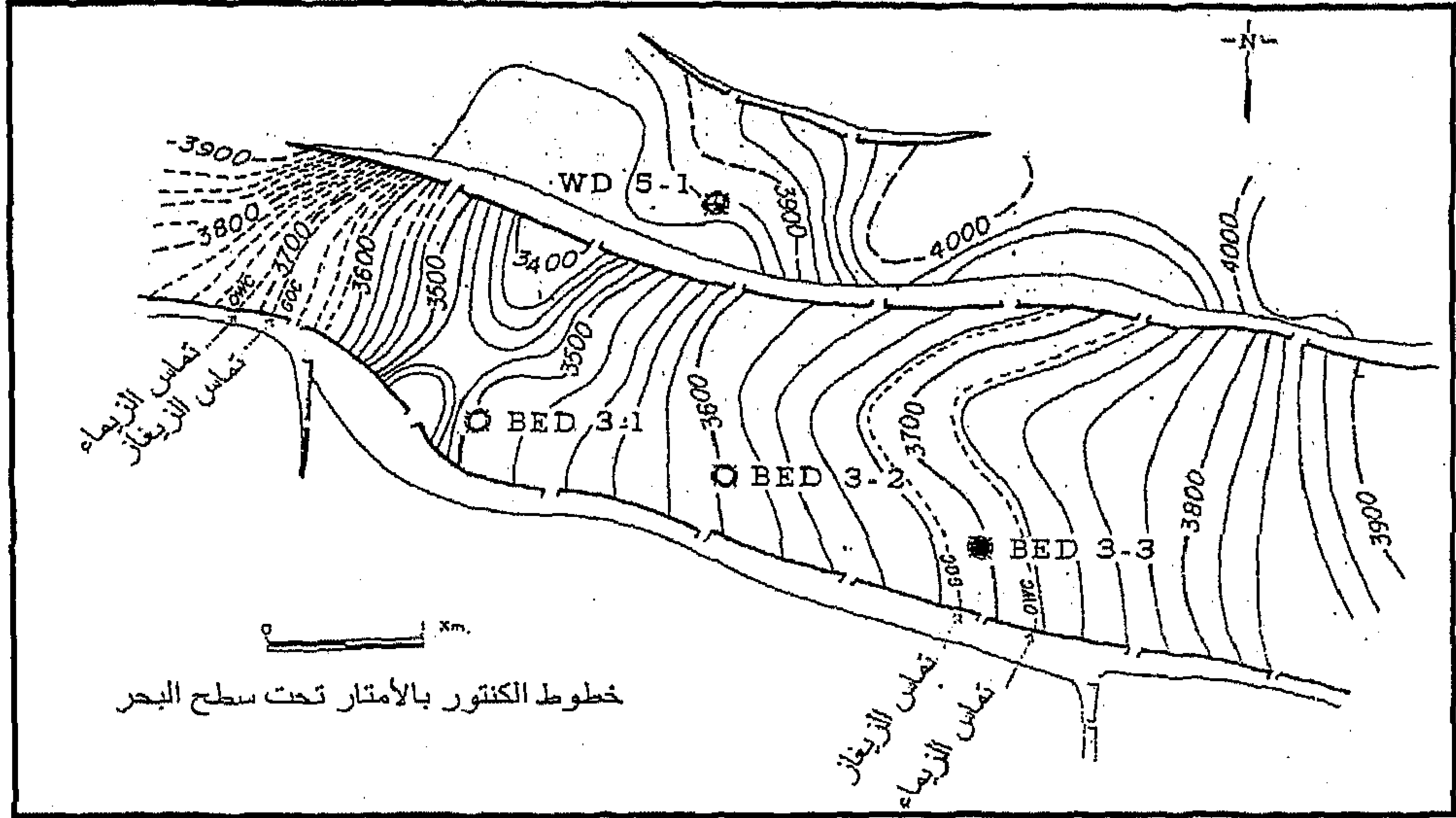
(ب)



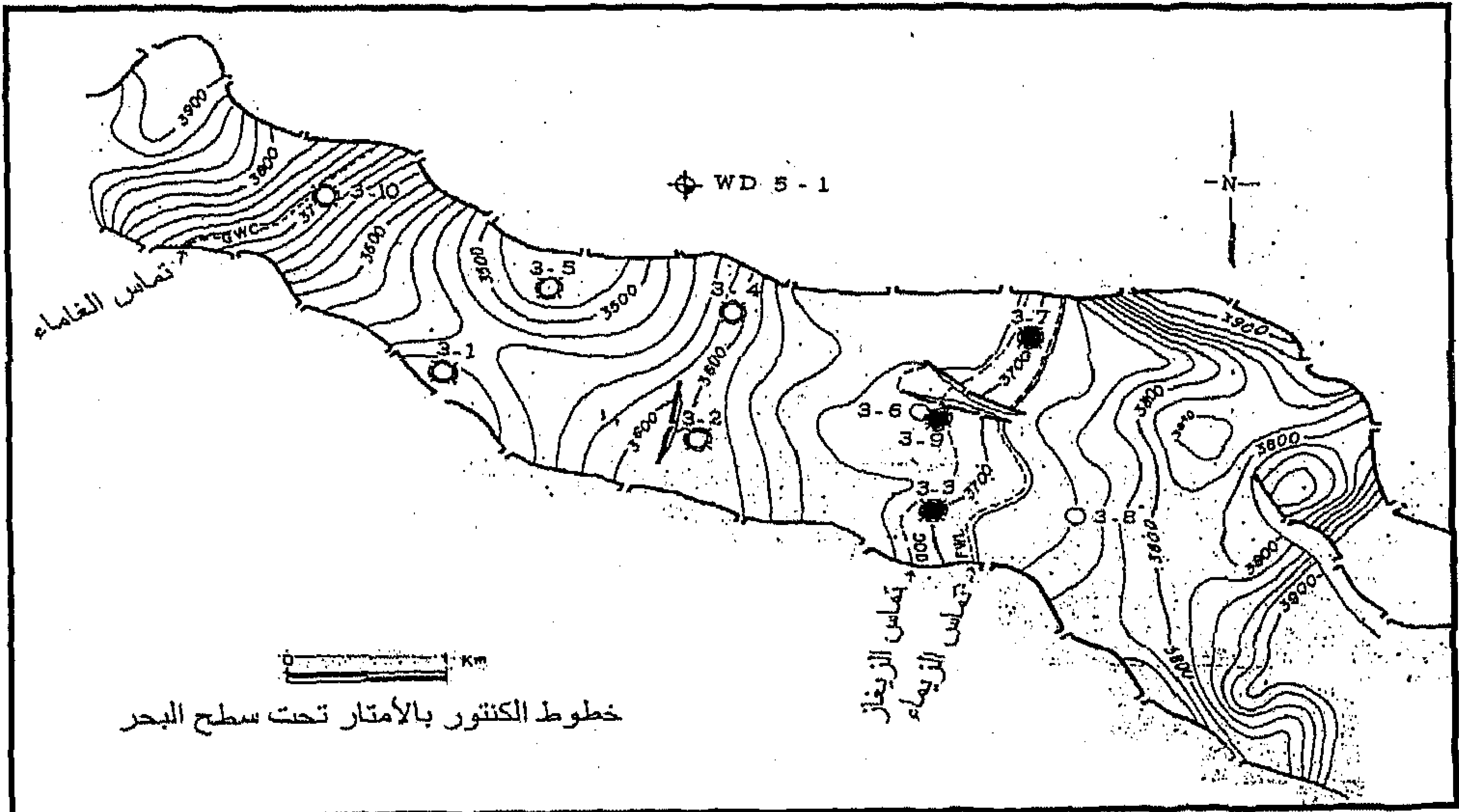
شكل ١٢-١٩: مقارنة بين نتائج المسح السيزمي الثنائي الأبعاد (أ) والثلاثي الأبعاد (ب) في حقل العثمانية بالسعودية حيث يوضح المسح الثلاثي بجلاء طبيعة التركيب الجيولوجي والذي تعترضه مجموعة من الصدوع التي تسببت في تقسيم الخزان المنتج (العرب **D**) إلى وحدات مستقلة مما ساعد في وضع الخطة المناسبة لتنمية الحقل.

وفي مصر كان أول استخدام للمسح الثلاثي قامت به شركة شل في منتصف عام ١٩٩٨ بمناطق بدر الدين بالصحراء الغربية ولمساحات غطت أكثر من ٥٠٠ كيلومتر مربع بهدف الحصول على صورة أفضل للتراكيب الجيولوجية والمصايد البترولية هناك والتي سبق رسمها من المسح الثنائي الأبعاد، ولقد كان بفضل المعلومات الدقيقة التي نتجت عن المسح الثلاثي أن شهدت الفترة من ١٩٨٩ - ١٩٩١ حفر ١٠ آبار تقييمية وإنمائية حققت جميعها أهدافها وأكدت وجود الغاز الطبيعي والزيت ليس فقط في خزان الحجر الرملي المعروف باسم خريطة Kharita من العصر الكريتاوي بل تخطته إلى آفاق بترولية جديدة في طبقات بحرية وأبو رواش التي تعلوه مما أضاف الكثير إلى الاحتياطيات البترولية وساعد على تقليص وترشيد عدد الآبار التي كان مخططاً لها لتنمية الحقول بهذه المنطقة وتعويض ما تم إنفاقه على المسح الثلاثي، والشكل ١٢-٢٠ يمثل خريطتين تركيبيتين في حقل بدر-٣ (BED-3) بالصحراء الغربية على سطح تكوين "خريطة"، الأولى من بيانات المسح السيزمي ثنائي الأبعاد والثانية من المسح الثلاثي الأبعاد، وبمقارنة الخريطتين يلاحظ أن خريطة المسح الثلاثي أكثر تفصيلاً ودقة من حيث شكل خطوط الكنتور وتوافقها وكذا مواقع الصدوع وعلى الأخص في الطرف الغربي من التركيب المستهضب horst مما عزّز الفرصة في العثور على حافة الزيت oil rim تحت التجمع العلوي للغاز في هذا الحقل وهو ما أكدته البئر التقييمية BED3-3، وهو ما أدى

إلى الحصول على تقديرات أكثر دقة للاحتياطيات البترولية هناك حيث قدرت بنحو ٥٠ مليون برميل من الزيت الخام داخل تلك الحافة بالإضافة إلى احتياطيات الغاز الضخمة هناك وسوف نتناول ذلك بشيء من التفصيل في الفصل الـ ٣٠..



(أ) خريطة المسح السيزمي ثنائي الأبعاد.



(ب) خريطة المسح السيزمي ثلاثي الأبعاد.

شكل ١٢-٢٠: مقارنة بين نتائج المسحين الثنائي الأبعاد (أ) والثلاثي الأبعاد (ب) في منطقة بدر-٣ بالصحراء الغربية في مصر حيث تعطي خريطة المسح الثلاثي تفاصيل أكثر وأدق بالنسبة للتركيب الجيولوجي هناك.

وقد شجعت هذه الاكتشافات الشركات العاملة بالبلاد على استخدام هذه التقنية الجديدة من المسح السيزمي ضمن برامجها البحثية، وكان من أحدث الاكتشافات التي حققتها شركة بترول خليج السويس (جابكو Gupco) في تلك الآونة عندما تم العثور على طبقة بسمك ٦ أمتار عند عمق ٤٥٠٠ متر في منطقة امتياز رأس البر البحرية، وتم إختبار هذه الطبقة بواقع ٣٥ مليون قدم مكعبة/ يوم من الغاز الطبيعي و٢٣٠٠ برميل/ يوم من المتكثفات. وإضافة إلى ذلك هناك العديد من الأمثلة التي تؤكد كفاءة المسح السيزمي ثلاثي الأبعاد بالرغم من تكلفته التي ما زالت عالية مقارنة بالمسح الثنائي الأبعاد، ويمكن تلخيص فوائد المسح السيزمي ثلاثي الأبعاد فيما يلي:

- الحصول على صورة مفصلة للتراكيب التحتسطحية وما قد تحتويه من إمكانيات بترولية.
- توفير النفقات وتجنب حفر الآبار في غير موضعها والتي قد تكون خاوية.
- ترشيد حفر الآبار الإنمائية.
- تجنب إقامة الأرصفة والمنصات في مواقع غير ملائمة.
- إمكانية نمذجة ومحاكاة الخزانات الجوفية بشكل أفضل وأقرب إلى الحقيقة.

الاستكشاف السيزمي رباعي الأبعاد:

المسح السيزمي رباعي الأبعاد 4-D seismic هو في الحقيقة مسح سيزمي ثلاثي الأبعاد يرتبط البعد الرابع فيه بالزمن time لذا يطلق عليه أحياناً time lapse 3-D seismic، وتقوم فكرة هذه التقنية على إجراء مسح سيزمي ثلاثي الأبعاد على فترة أو عدة فترات زمنية متعاقبة (مرة كل عام أو عامين أو أكثر) في نفس المنطقة وبنفس المقاييس والمدخلات وذلك بهدف تعقب نمط انسياب الموائع من غاز وزيت وماء داخل الخزان الجوفي، وكلما تواصل صرف هذه الموائع أحدث ذلك تغيراً في درجة الحرارة والضغط بالخزان وكذا تركيب الموائع به، ويبدأ الغاز المذاب في الانطلاق ويحل الماء محل الغاز والزيت بمرور الوقت والإنتاج، ولكن قد تبقى هناك أماكن أو جيوب من الزيت أو الغاز تجاوزتها عمليات الإنتاج وبقيت على حالها بمحتواها الأصلي من الهيدروكربون وتسمى هذه الأماكن الجيوب المتجاوَزَة bypassed pays، وقد تكون هناك كميات

اقتصادية من البترول الذي يمكن استعادته وبنسبة كبيرة قد تصل إلى ٦٥-٧٥٪، وعلى سبيل المثال فقد نجحت المسوح السيزمية الثلاثية الأبعاد التي أجرتها شركة تكساكو Texaco خلال الأعوام ١٩٨٥ و١٩٨٨ و١٩٩٢ و١٩٩٤ في حقل أيوجين آيلاند Eugen Island بالمنطقة البحرية لولاية لويزيانا الأمريكية في تحديد عدد من الجيوب المتجاوزة والتي تخطتها عمليات الإنتاج بسبب طبيعة وسلوك الخزان الجوفي وتأكدت صحة الاستنتاجات عندما حفرت بئر أفقية هناك مستهدفة تلك الجيوب فأنتجت زيتاً جاوز الإنتاج المجمع منه المليون برميل.

الاستكشاف السيزمي متعدد المركبات (Four–C) multicomponent seismic:

هذا نوع حديث من المسح السيزمي والذي تستخدم فيه قياسات الموجات الانضغاطية compressional (الطولية) وموجات القص shear (المستعرضة) التي تنتج عن المصدر السيزمي، والموجة الانضغاطية هي تلك الموجة التي تتحرك فيها الجسيمات داخل الوسط في نفس اتجاه إنتشار الموجة ذاتها من خلال تضاغطات وانفراجات متوالية، أما موجة القص فتكون حركة الجسيمات إلى أعلى وإلى أسفل متعامدة على اتجاه انتشار الموجة وتشبه في ذلك حركة الأمواج على سطح البحر، وموجات القص أيضاً أقل في سرعتها من الموجات الانضغاطية كما أنها لا تستطيع المرور خلال السوائل أو الهواء.

في المسح السيزمي المعتاد يتم تسجيل الموجات الطولية بواسطة جيوفون أحادي المركبة one-component geophone، أما في المسح الرباعي المركبات (4-C) فإن ذلك يتضمن تسجيل كل من الموجات الطولية (أحادي المركبة) وثلاثة جيوفونات متعامدة على بعضها لتسجيل موجات القص (ثلاثي المركبات) وذلك بهدف تحديد مواقع واتجاهات الشقوق التحتسطحية وكذا الطبقات الصخرية والموائع التي مرت خلالها الموجات السيزمية، وكما أن الموجات الطولية تتأثر وتتشوه بوجود الغاز في الصخور الرسوبية فإن هذا لا يحدث بالنسبة لموجات القص مما يجعل ذلك وسيلة جيدة للحصول على صورة واضحة وأكثر دقة في التعرف على الطبقات الحاملة للغاز الطبيعي.

الفصل الثالث عشر

نشاط الحفر وتشريعاته المختلفة

لا تعد عمليات الاستكشاف الجيولوجية والجيوكيميائية والجيوفيزيائية التي سبق تناولها أن ترجح وجود تكاوين جيولوجية ملائمة للتجمعات البترولية، أما التثبت من وجود تلك التجمعات فلا يأتي إلا بالحفر، فالحفر هو الفيصل، فكم من مصايد تحتسطحية بدت جذابة على الخرائط ولكن بحفرها جاءت خاوية بلا زيت أو غاز وراحت بذلك ملايين الدولارات هباء منثوراً، لذا كان لابد من وجود مبررات قوية من خلال المعلومات والبيانات المتكاملة سواء كانت من السطح أو تحت السطح وعلى أسس جيدة وحرفية عالية حتى يمكن تقليص المخاطر وتعظيم نسبة النجاح في إحراز آبار منتجة، ولا يقتصر نشاط الحفر على مرحلة الاستكشاف فهو متواصل أيضاً خلال مرحلة الاستغلال والإنتاج، وبجانب الآبار الاستكشافية هناك الآبار الإنهائية والإنتاجية، ولا يجري الحفر بشكل عشوائي فهو نشاط تحكمه التشريعات القائمة وكذا الاتفاقيات المختلفة التي تبرم بين الأطراف المعنية وتتعهد بالالتزام بها، لذا حري بنا أن نلقي بعض الضوء على هذه الاتفاقيات وطبيعتها في السياق التالي.

الاتفاقيات البترولية والعقود:

يسبق نشاط الحفر توقيع عدد من الاتفاقيات والعقود agreements and contracts التي يتم إبرامها بين الأطراف المعنية والتي تشمل في هذا الخصوص الجهة المالكة (مثلا الحكومة المضيفة host government) من جانب وشركات البحث الأجنبية (المقاول contractor) من جانب آخر، وعادة ما تكون من الشركات الكبرى ذات المكانة الدولية المعروفة، ولقد مرت هذه الاتفاقيات بمراحل مختلفة وأنظمة استهدفت الصالح العام للمستفيدين وتشجيع الشركات للدفع بالمزيد من الاستثمارات ليس فقط فيما يتعلق بالبحث والتنقيب عن الزيت الخام بل وأيضاً الغاز الطبيعي الذي كان لعهد قريب يؤول عند اكتشافه إلى الدولة المضيفة دون الشريك الأجنبي وفقدانه بالتالي لما أنفقه من مبالغ طائلة في عمليات الاستكشاف، ويسبق إبرام الاتفاقيات أن تقوم الحكومة المضيفة بالإعلان عن قطاعات البحث التي تطرحها في مزايدة عالمية تدعو إليها الشركات

المتخصصة في مجال البحث عن البترول والإنتاج ويمكن للشركات الراغبة التقدم بعروضها طبقاً للإجراءات والشروط الأساسية المعلن عنها كما هو موضح بالشكل ١٣-١ والذي يمثل نموذجاً لمزايدة حديثة أعلنت عنها هيئة البترول المصرية لعدد من قطاعات البحث في الأحواض الترسيبية بمصر.

جمهورية مصر العربية

وزارة البترول

الهيئة المصرية العامة للبترول

الهيئة المصرية العامة للبترول

إعلان

المزايدة العالمية للبحث عن البترول واستغلاله لعام ٢٠١١

يسر الهيئة المصرية العامة للبترول

دعوة الشركات المتخصصة فى مجال البحث عن البترول وإنتاجه

للاشتراك فى المزايدة العالمية لعام ٢٠١١

والتى تضم خمسة عشر (١٥) قطاعا للبحث فى الأحواض الترسيبية بخليج السويس والصحراء الشرقية والغربية وسيناء كما هو موضح بالخريطة وطبقاً لنموذج اتفاقيات اقتسام الإنتاج المعمول به فى جمهورية مصر العربية.

مناطق المزايدة العالمية لعام ٢٠١١

- يمكن للشركات الراغبة التقدم بعروض لهذه القطاعات وفقا للإجراءات والشروط الأساسية المعلن عنها.
- شراء حزم البيانات والاطلاع على المعلومات الخاصة بمناطق هذه المزايدة في مركز المعلومات الجيولوجية والجيوفيزيقية بمدينة نصر بالأسعار المعلنة وبناء على طلب مسبق من الشركة الراغبة وكذلك يمكن الحصول على البيانات الأساسية وإحداثيات المناطق وإجراءات وشروط هذه المزايدة ونموذج الاتفاقية من موقع الهيئة على شبكة الإنترنت : www.egpc.com.eg
- آخر موعد لاستلام العروض: يوم الأثنين الموافق ٣٠ يناير ٢٠١٢ الساعة الثانية عشرة ظهرا.

لمزيد من المعلومات يرجى الاتصال بـ:

السيد الجيولوجى/ نائب الرئيس التنفيذى للهيئة المصرية العامة للبترول للاتفاقيات

تليفون : ٢٧٠٦٥٣٥٨ (٢٠٢)

فاكس : ٢٧٠٦٥٨٨٧ (٢٠٢)

شكل ١٣-١ : نموذج للإعلان عن مزايدة عالمية للبحث عن البترول وإنتاج في مصر.

وتحت مظلة الاتفاقيات هناك عدد من الأنظمة منها:

نظام الإتاوة:

وهو أقدم أشكال اتفاقيات الالتزام (الامتياز) concession agreements وقد كان سائداً في معظم مناطق إنتاج البترول في العالم مثل إندونيسيا والسعودية والكويت وفنزويلا وإيران والعراق وغيرها وفي هذا النظام تقوم الشركة صاحبة الالتزام concessionaire (contractor) بأعمال البحث والاستكشاف على نفقتها وعلى مسئوليتها المطلقة، فإذا لم توفق في العثور على البترول تحملت وحدها الخسائر المترتبة على ذلك، أما إذا نجحت في العثور على البترول فإنها تقوم بسداد إتاوة royalty للحكومة المضيفة وهي عبارة عن نسبة معينة من قيمة إنتاج الخام، وكانت هذه النسبة قد وصلت إلى حوالي ١٢-١٣٪ من قيمة الزيت المنتج، ولا يعمل بهذا النظام حاليا إلا في عدد قليل من البلدان المنتجة.

نظام المشاركة:

ويتلخص نظام المشاركة participation system في أن شركة البحث الأجنبية تحصل على امتياز البحث عن البترول في منطقة محددة ولمدة معينة، وتقوم هذه الشركة (المقاول) بتنفيذ برنامج محدد للبحث يتضمن حفر عدد معين من الآبار الاستكشافية ويكون تمويل هذه العمليات على نفقتها الخاصة، وإذا لم تسفر عمليات البحث عن اكتشاف البترول بكميات تجارية انتهى عقد الامتياز بانتهاء مدته وتحملت الشركة الأجنبية الخسارة الناجمة عن ذلك وحدها، أما إذا أسفرت العمليات عن اكتشاف بترولي فإن الحكومة المضيفة تقوم بتحمل نصف تكلفة عمليات البحث، وتتكون شركة مشتركة joint company لتقوم بعمليات تنمية الكشف والإنتاج بين الشريك الأجنبي والحكومة المضيفة وتكون عملية التمويل في هذه المرحلة مناصفة بين الطرفين، ثم يقسم الزيت المنتج بين الشريكين وذلك وفقاً للنسب المتفق عليها في اتفاقية الالتزام.

نظام اقتسام الإنتاج:

وهو أحدث مراحل تطور اتفاقيات البحث عن البترول في العالم ويسمى أيضا بالنموذج الإندونيسي the Indonesian model حيث اقترن بأول اتفاقية أبرمت وقتها بين إندونيسيا والشريك الأجنبي في أواسط القرن الماضي، ويقوم نظام اقتسام الإنتاج

production sharing system على أساس إبرام اتفاقية بين الحكومة المضيفة والشريك الأجنبي (المقاول)، وتغطي الاتفاقية منطقة محددة ومدة زمنية معينة للبحث، وقد تقسم مدة البحث إلى مدد فرعية حسب الاتفاق، ويلتزم المقاول ببرنامج بحث محدد لعلميات الاستكشاف خلال فترة البحث ويشتمل البرنامج على عمليات سيزمية يعقبها برنامج لحفر عدد من الآبار ينص عليها في الاتفاقية، ويلتزم المقاول بإنفاق مبلغ معين خلال كل فترة من فترات البحث الفرعية على برنامج العمل (المسح السيزمي، الحفر) فإذا كانت تكلفة العمليات الفعلية أقل من المحددة بالاتفاقية التزم المقاول بسداد الفارق نقداً إلى الحكومة المضيفة، ويستطيع المقاول في نهاية كل فترة فرعية من فترات البحث أن يتخلى relinquish عن الفترات اللاحقة كلية، أو أن يختار دخول الفترة التالية، ولكنه عندئذ يلتزم بالتخلي إجبارياً mandatory relinquishment عن نسبة من مساحة المنطقة التي تغطيها اتفاقية البحث وعادة ما تكون بواقع ٢٥٪ من مساحة المنطقة الأصلية، وإذا انتهت فترة البحث السارية دون تحقيق اكتشاف تجاري وكان المقاول غير راغب في دخول مدة بحث تالية أو إذا انتهت المدة الكلية للبحث دون تحقيق اكتشاف تجاري فإن الاتفاقية تعتبر منتهية ويتحمل المقاول وحده كافة نفقات البحث أياً كان حجمها، أما إذا تحقق اكتشاف تجاري باتفاق الطرفين وجدارة هذا الاكتشاف بالتنمية فإن الحكومة تمنح المنطقة التي يقع بها هذا الاكتشاف عقد تنميةdevelopment lease لعدة سنوات (ربما كانت عشرة أو عشرين) كما يمكن أن تمد لعدد إضافي من السنين، وخلال فترة التنمية يقوم المقاول بتنفيذ برنامج يتفق عليه لتنمية واستغلال هذا الكشف، وعندما يبدأ الإنتاج التجاري فإن كمية الزيت المنتجة تقسم بين الشريكين وسوف نتناول ذلك بالتفصيل في الفصل التاسع والعشرين. وتتضمن اتفاقيات الالتزام عادة منحاً يقدمها المقاول للحكومة المضيفة منها منحة التوقيع signature bonus وهي منحة تمنح عند توقيع الإتفاقية أو عند بداية كل مدة فرعية من مدد البحث المنصوص عليها، وأما منح الإنتاج production bonuses فهي منح يسددها المقاول للحكومة عند بلوغ حد معين للإنتاج، وفي حالات خاصة توجد منحة لمجرد إعلان الاكتشاف التجاري، وجميع هذه المنح لا يستردها المقاول ضمن عملية استرداده للنفقات التي تكبدها سواء للبحث أو التنمية.

والجدول ١٣-١ يعرض نموذجاً لإحدى اتفاقيات الالتزام البترولية (نظام اقتسام الإنتاج) ويلخص أهم شروط هذه الاتفاقية التي شملت منطقة بدر الدين بالصحراء الغربية لمصر وأبرمت بين الحكومة المصرية ممثلة في الهيئة المصرية العامة للبترول EGPC وشركة شل العالمية والتي ما زالت سارية حتى اليوم كما أدخلت عليها في تواريخ لاحقة بعض البنود كان أهمها بند الغاز gas clause amendment والذي بموجبه يعطي للشريك الأجنبي حق إنتاج واقتسام الغاز بنسب ينفق عليها، وهو أمر شجع شركات البحث على مضاعفة حجم استثمارتها بعد أن كان الغاز المكتشف يعتبر مملوكاً للحكومة المضيفة.

اعتماد الصرف:

قبل الشروع في حفر بئر ما تقوم الإدارة المعنية بالشركة بإعداد نموذج يتعلق باعتمادات الصرف authorisation for expenditure للبئر وهو نموذج يوضح بصورة تقديرية التكلفة المرتقبة لحفر تلك البئر وكذا عملية إكمالها في حالة إذا ما ستكون البئر منتجة أو جافة، كما يتضمن النموذج المصروفات الخاصة بالبنود غير الملموسة intangible في عمليتي الحفر والإكمال وأيضا التجهيزات المرتبطة بهما، وتشمل هذه البنود مرتبات العاملين والخدمات المقدمة والمعدات التي يمكن استعادتها من البئر بعد الحفر، كما يشتمل النموذج (جدول ١٣-٢) على تكلفة تأجير جهاز الحفر وأيضاً سوائل الحفر وكذا المحركات الأساسية والمضخات وأنابيب الإنتاج والفواصل وغيرها، وبعد اعتماد هذا النموذج يكون صالحاً لاستخدامه كدليل استرشادي لضبط وترشيد النفقات المزمعة.

جدول ١٣-١: اتفاقية امتياز منطقة بدر الدين (الصحراء الغربية - مصر)

تاريخ بدء تنفيذ الاتفاقية: ٥ يونيه ١٩٨٠.

منحة التوقيع لصالح الهيئة المصرية العامة للبترول: نصف مليون دولار أمريكي.

مدة البحث الأولى: ٤ سنوات (٥/ ٦/ ٨٠ - ٤/ ٦/ ١٩٨٤)

الالتزام المالي: إنفاق ٥ ملايين دولار أمريكي (ارتفعت إلى ١٠ ملايين دولار بعد ذلك).

برنامج العمل: إجراء بحث سيزمي وحفر بئر استكشافية واحدة (ارتفعت إلى اثنتين).

التخليات: ٢٥٪ من مساحة منطقة البحث مع نهاية المدة الأولى.

مدة البحث الثانية: سنتان (٥/ ٦/ ٨٤ - ٤/ ٦/ ١٩٨٦).

الالتزام المالي: إنفاق ١٢ ملايين دولار أمريكي.

برنامج العمل: إجراء بحث سيزمي وحفر بئر واحدة.

التخليات: ٢٥٪ من مساحة منطقة البحث مع نهاية المدة الثانية.

مدة البحث الثالثة: سنتان (٥/ ٦/ ٨٦ - ٤/ ٦/ ١٩٨٨).

الالتزام المالي: إنفاق ٨ ملايين دولار أمريكي.

برنامج العمل: إجراء بحث سيزمي وحفر بئر واحدة.

التخليات: تخل كامل لجميع المساحات غير المنتجة بحلول نهاية فترة البحث الثالثة.

تغطية الاتفاقية: زيت خام وغاز طبيعي (بعد إدخال بند الغاز).

منح الإنتاج: ١.١ و٢ مليون دولار أمريكي.

نسبة الاسترداد من مصروفات البحث: ٤٠٪.

نسبة اقتسام الإنتاج: الـ ٦٠٪ المتبقية.

الحكومة المصرية (٪)	شركة شل (٪)	
٧٥	٢٥	حتى سقف إنتاج ١٠٠،٠٠٠ برميل في اليوم.
٧٧.٥	٢٢.٥	من ١٠٠،٠٠٠ إلى ٢٥٠،٠٠٠ برميل في اليوم.
٨٠	٢٠	أقل من ٢٠٠،٠٠٠ برميل في اليوم.

معدل الاسترداد لمصروفات الاستكشاف: ٢٠٪ في السنة.

معدل استرداد مصروفات التشغيل: ٢٠٪ في السنة.

نسبة فائض الزيت: ٨٠٪ للحكومة المصرية، ٢٠٪ لشركة شل.

مدة التنمية: ٢٠ + ١٠ سنوات.

جدول ١٣-٢: نموذج لاعتماد الصرف

اعتماد الصرف AFE **Authority for Expenditure**		
بنود البئر غير الملموسة:	بئر جافة	بئر مكمَّلة
• تجهيز الموقع	–	–
• عمق البئر بالأمتار	–	–
• الأسمنت والقيسون	–	–
• تسجيلات الآبار	–	–
• سائل الحفر	–	–
بنود الإكمال غير الملموسة:		
• عملية السمنتة	–	–
• عملية التثقيب	–	–
• عملية التكسير أو المعالجة بالحامض	–	–
المعدات والتجهيزات:		
• القيسون وتغليف البئر	–	–
• أنبوب الإنتاج	–	–
• المضخات	–	–
• الفواصل	–	–
• صهاريج التخزين	–	–
• القيسون وتغليف البئر	–	–
التكلفة الإجمالية للبئر (دولار أمريكي)	**US$**	**US$**

عقود الحفر:

عادة ما ترجع ملكية أجهزة الحفر إلى شركات متخصصة حيث تقوم بإدارتها وتشغيلها لحساب شركة الاستكشاف إذا ما تم التعاقد بينهما، ويتضمن عقد الحفر drilling contract عدداً من البنود تشمل البيانات الخاصة بالبئر من حيث العمق النهائي

لها وعمق الخزان المستهدف وموقع الحفر ذاته، كما يتضمن أيضا التاريخ المقترح لبدء عملية الحفر، وأقطار البئر ووضع البئر من حيث إنها بئر رأسية أو مائلة وسائل الحفر وكافة التسجيلات والاختبارات المدرجة، وأحجام القيسون وعمليات السمنتة وكيفية الإكمال وأطواق الحفر المطلوبة، وكذا نوع التكوينات التحتسطحية المزمع اختراقها بواسطة البئر، كما يتضمن العقد الفترات التي سيتوقف فيها الحفر لأسباب فنية مثل إجراء التسجيلات الكهربائية وغيرها.

وهناك ثلاثة أنواع من عقود الحفر وتشمل:

- العقود تكلفة الحفر بالمتر footage drilling contract: حتى الوصول إلى العمق النهائي للبئر، وتقوم على أساس التكلفة الكلية حتى تصل البئر إلى عمقها النهائي، ويشيع هذا النوع من العقود في العمليات البرية.
- عقود التكلفة اليومية day work contract: وهي العقود الأكثر شيوعا في العمليات البحرية وتعتمد على تقدير تكلفة الحفر لليوم الواحد إلى أن تصل البئر إلى العمق النهائي لها.
- عقود الإنجاز تسليم مفتاح turnkey contract: حيث يقوم المتعهد بموجبها بتسليم البئر كاملة الحفر (تسليم مفتاح).
- العقود المشتركة combination contract: وهي عقود جزء منها يرتبط بالتكلفة بالمتر والجزء الآخر بعقود تسليم مفتاح.

وأثناء عمليات الحفر يشارك عدد من الشركات بعضها لتقديم الخدمة service company مثل شركات التسجيلات الكهربائية وتسجيلات الطين وغيرها، والبعض الآخر لتوريد ما يلزم من معدات كتلك الخاصة بالقيسون وتعرف بالشركات الموردة supply company .

اتفاقيات التشغيل المشترك واتفاقيات الدعم:

بالإضافة إلى اتفاقيات الالتزام (الامتياز) والتي تنظم في النهاية حصة الشريك الأجنبي من الزيت أو الغاز المنتج، هناك أيضا اتفاقيات أخرى تهدف، في ظل وجود ميزانية محدودة، إلى الحصول على المعلومات التحتسطحية الواردة من الآبار نظير ما تقدمه

الأطراف المعنية من إسهامات مالية مثل اتفاقية التشغيل المشترك واتفاقية الدعم والتي نلخصها فيما يلي:

- **اتفاقية التشغيل المشترك** joint operating agreements (JOA): وهي نوع من الإتفاقيات التي تبرم بين الأطراف المعنية من أجل تنمية منطقة بترولية معينة للقيام بحفر بئر أو عدد من الآبار دون التخوف من الآثار المالية السلبية عند الفشل في العثور على البترول، وتحدد في هذه الاتفاقية الحقوق والواجبات المنوطة بكل طرف وحصته فيما يقدمه من مساهمة مالية، والمشغل operator في هذه الحالة هو ذلك الطرف الذي يدير ويراقب عمليات الحفر يوما بيوم، كما تحدد الاتفاقية لكل طرف الكمية المنتجة إذا ما تحقق النجاح.
- **اتفاقية الدعم** support (contribution) agreement : وتهدف هذه الاتفاقية إلى تشجيع ودعم حفر الآبار من خلال طرف ممول من الناحية المالية ولا ضرر إن كانت البئر أو مجموعة الآبار التي سيتم حفرها غير منتجة، فالهدف الرئيس من وراء ذلك هو الحصول على المعلومات الجيولوجية والتحتسطحية من هذه الآبار حيث تسهم هذه المعلومات في التعرف على طبيعة المنطقة والوقوف على مدى إمكانياتها البترولية .

تجهيز موقع الحفر:

يسبق عملية الحفر إعداد وتحضير جيد للموقع site preparation المخطط له والحصول أيضاً على الموافقات المحلية والحكومية ومنها الالتزام بشكل خاص بالاشتراطات البيئية للحفاظ على عدم الإضرار بالبيئة في هذا المكان، كما يتم بدقة تحديد إحداثيات البئر وارتفاعها من سطح الأرض، كما يتم أيضا تسوية أرض الموقع وتهيئة طريق معبدة للتحرك إلى ومن الموقع في أمان وسلام، وفي حالة النشاط البحري لابد من معرفة عمق المياه عند الموقع والظروف البحرية السائدة هناك، وفي جميع الأحوال لابد من الالتزام بكافة الاشتراطات الخاصة بالحفاظ على سلامة البيئة وعدم الإضرار بها وتلوثها.

وفي الموقع الأرضي يجري عمل حفرة كبيرة بجوار الموقع تسمى الحفرة الاحتياطية reserve pit وتبطن بالبلاستيك والأسمنت منعا لتسرب سوائل الحفر إلى التربة، ويلقى

في هذه الحفرة الفائض من سائل الحفر وكذا الكسارة الصخرية وأي مواد أخرى ترد من البئر، هذا ويجري إمداد الموقع بالماء اللازم له إما بحفر بئر للماء بالقرب من الموقع أو عن طريق مد أنبوب لجلب ذلك الماء .

وإذا كانت البئر الاستكشافية المراد حفرها غير عميقة (حوالي ١٠٠٠ متر) فإن جهاز الحفر يكون عادة من النوع المحمول على الشاحنات أو المقطورات، ويسمى جهاز الحفر بالحفَّارة المحمولة truck mounted or portable rig أما إذا كانت البئر المراد حفرها عميقة فإنه يتم توريد جهاز الحفر في هيئة مكونات مفككة تحملها الشاحنات حيث يتم تركيبها وإقامتها على الموقع بواسطة الفنيين المعنيين.

وكلما زاد عمق البئر كانت الحاجة ماسة إلى جهاز حفر ذي قدرات معينة لكي يتمكن من تحمل الأثقال الهائلة من المعدات والتجهيزات اللازمة للغرض، وفي المناطق النائية كثيراً ما تستخدم الحفارات التي تعرف بالهيليرج helirig والتي تصمم من مكونات خاصة ويتم نقلها بواسطة المروحيات (الطائرات العمودية) .

وكما يتم تركيب جهاز الحفر rig up فإنه يتم تفكيكه rig down حالما انتهت أعمال الحفر والإكمال، ولكل بئر بيان بتاريخ بدء الحفر spud-in date وكذا تاريخ الوصول إلى العمق النهائي للبئر، وعند حفر بئر عميقة أو متوسطة العمق يقوم حفار صغير بعمل ثقب ذي قطر ما بين ٧ إلى ٣٠ متراً (٢٠ إلى ١٠٠ قدم) يسمى الثقب الدليلي conductor hole يعقبه إنزال أنبوب أو قيسون conductor casing لتغليف هذا الثقب ويجري أيضاً تدعيم الثقب بالأسمنت من الخارج، وإذا كانت تربة الموقع رخوة (لينة) فإنه يمكن دق هذا القيسون دون حفر ذلك الثقب، ويعمل القيسون الدليلي على استقرار وتثبيت الجزء العلوي من البئر وأيضاً كجزء ملحق مساعد لموانع تفجر البئر في المناطق التي يتصادف فيها وجود غازات عند أعماق ضحلة.

أنواع الآبار:

تتعدد أنواع الآبار types of wells التي يخطط لحفرها في المناطق ذات الاهتمام، ويجري تسميتها حسب الغرض أو الأغراض التي من أجلها يتم حفرها، فالبئر التي تحفر في منطقة بكر من أجل العثور على الزيت أو الغاز الطبيعي تسمى بئراً استكشافية

exploratory well أو كما يطلق عليها البعض القطة البرية wildcat لما ينطوي عليها من مجازفة محفوفة بالنجاح أو الفشل .

وتهدف البئر الاستكشافية إلى تحقيق أغراض منها اختبار مصيدة لم يسبق اختراقها بعد، أو اختبار خزان يقع على عمق أعلى أو أدنى من خزان منتج بالفعل في نفس حقل الزيت أو الغاز وتسمى البئر عندئذ بئر الكشف أو بئر الاكتشاف discovery well.

وبالطبع فإن الأمر لا يتوقف عند هذا الحد حيث ينبغي أن يتحدد بشكل جيد حجم الحقل وإمكانياته البترولية ومستواه الاقتصادي، ولا يتأتى ذلك إلا من خلال حفر آبار جديدة على الجوانب المختلفة للحقل المكتشف، وتسمى الآبار التي تعقب بئر الاكتشاف الآبار التقييمية appraisal، step out، delineation wells ، وإذا ما صادفت أي من هذه الآبار أحد السطوح الفاصلة بين الهيدروكربون والماء مثل تماس الزيياء وتماس الغاماء فهذا سوف يحدد بشكل قاطع حجم البركة الجوفية وبالتالي مقدار المخزونات البترولية الموجودة بالحقل المعني.

وأما تلك الآبار التي يتم حفرها داخل محيط الحقل بعد الانتهاء من تحديد امتداده المساحي وتهدف إلى تنمية الحقل واستغلاله فتسمى آبار التنمية أو الآبار الإنمائية development wells، وأما الآبار التي تحفر بين الآبار الإنتاجية بهدف زيادة معدلات الإنتاج واستنزاف الخزان هناك فتسمى الآبار البينية infill wells، وبالطبع فإن اختيار مواقع الحفر ليس أمراً سهلاً فهذا تحدده الدراسات الجيولوجية والخزانية تداركاً لعنصر المخاطرة وسعياً لتقليص الفشل وترشيداً لحجم المصروفات.

وجدير بالذكر أن المسافات بين الآبار (تباعد الآبار) well spacings تلعب دوراً مهماً في استغلال الحقول دون الإفراط في عدد الآبار المخطط حفرها أو في معدلات الإنتاج الزائدة، لذا فإنه يعطى لكل بئر وحدة للحفر والمسافة البئرية drilling and spacing unit (DSU)، وهي مساحة على شكل مربع أو مستطيل تقدر بحوالي ٤٠ أو ٨٠ فداناً acres وتستخدم كوحدة مناسبة لهذا الغرض، وتتوقف هذه المساحة على عاملين أساسيين هما لزوجة الزيت الخام ونفاذية الخزان المنتج.

وكلما كان الخام شديد اللزوجة وكانت النفاذية قليلة احتاج الأمر إلى مسافة (مباعدة) بئرية أصغر وذلك ضمانا لصرف drainage جيد للخام، أما في حالة الغاز فإن المسافة تكون أكبر كثيراً وفي حدود ٦٤٠ فداناً في أغلب الأحوال.

طرق الحفر المختلفة:

- **الحفر الدقاق:**

كما هو متعارف عليه وكما أشرنا من قبل هو أن صناعة البترول قد ولدت عام ١٨٥٩ بحفر بئر دريك وهي أول بئر حفرت بحثاً عن الزيت باستخدام الحفر الدقاق cable tool drilling، وجهاز الحفر الدقاق بسيط نسبياً في هيكله وكان نظام الرفع فيه في بداية الأمر يتكون من برج خشبي له أربعة أرجل يصل ارتفاعه ما بين ٢٢ و٢٧ متراً (أي ٧٢ و٨٧ قدماً) ويدار نظام الرفع والخفض بمحرك بخاري، لكن الأمر قد تطور بعد ذلك ليشمل أجهزة أكثر حداثة. وتقوم طريقة الحفر في الأساس على إحداث ضربات متكررة يسددها مثقب bit مربوط بعمود حفر، وهو قطعة طويلة من الصلب معلقة في طرف كبل معدني cable وكان عمود الحفر يهيىء الثقل اللازم لدفع المثقب في الأرض. أما الثقب المحدث في الأرض فيبقي فارغا إلا من قليل من الماء في القاع، وبعد حفر عدة أمتار يسحب المثقب من البئر لاستخراج ما تراكم فيها من حُفارة بواسطة دلو bailer عبارة عن أنبوب مفتوح ذي صمام في طرفه الأسفل، وكانت توضع في البئر من حين لآخر أنابيب من الصلب تعرف بأنابيب التبطين أو التغليف casing تحول دون تهدم جوانب البئر وتمنع الماء من التسرب إليها.

والحفر الدقاق طريقة بطيئة للغاية (٧ – ٨ أمتار حفر / يوم) وربما وصلت في بعض الأحيان إلى حوالي ٢٠ متراً في اليوم ويعتبر ذلك إنجازاً كبيراً بالنسبة لهذا النوع من الحفر، وقد تكون هذه الطريقة مجدية للآبار الضحلة وأيضا لانخفاض تكلفتها لكنها تخلو من وسائل احتياطية يمكن بواسطتها وقف الزيت والغاز عن التدفق بفعل الضغط الجوفي مما كان يؤدي إلى تفجر الآبار blow out وقذفها لكميات كبيرة من الزيت والغاز ربما تسببت في اشتعال الحرائق بموقع الحفر، وحقيقة الأمر أن الحفر الدقاق كان الطريقة الوحيدة في كشف حقول البترول خلال القرنين الماضيين. وقد استطاع أحد أجهزة

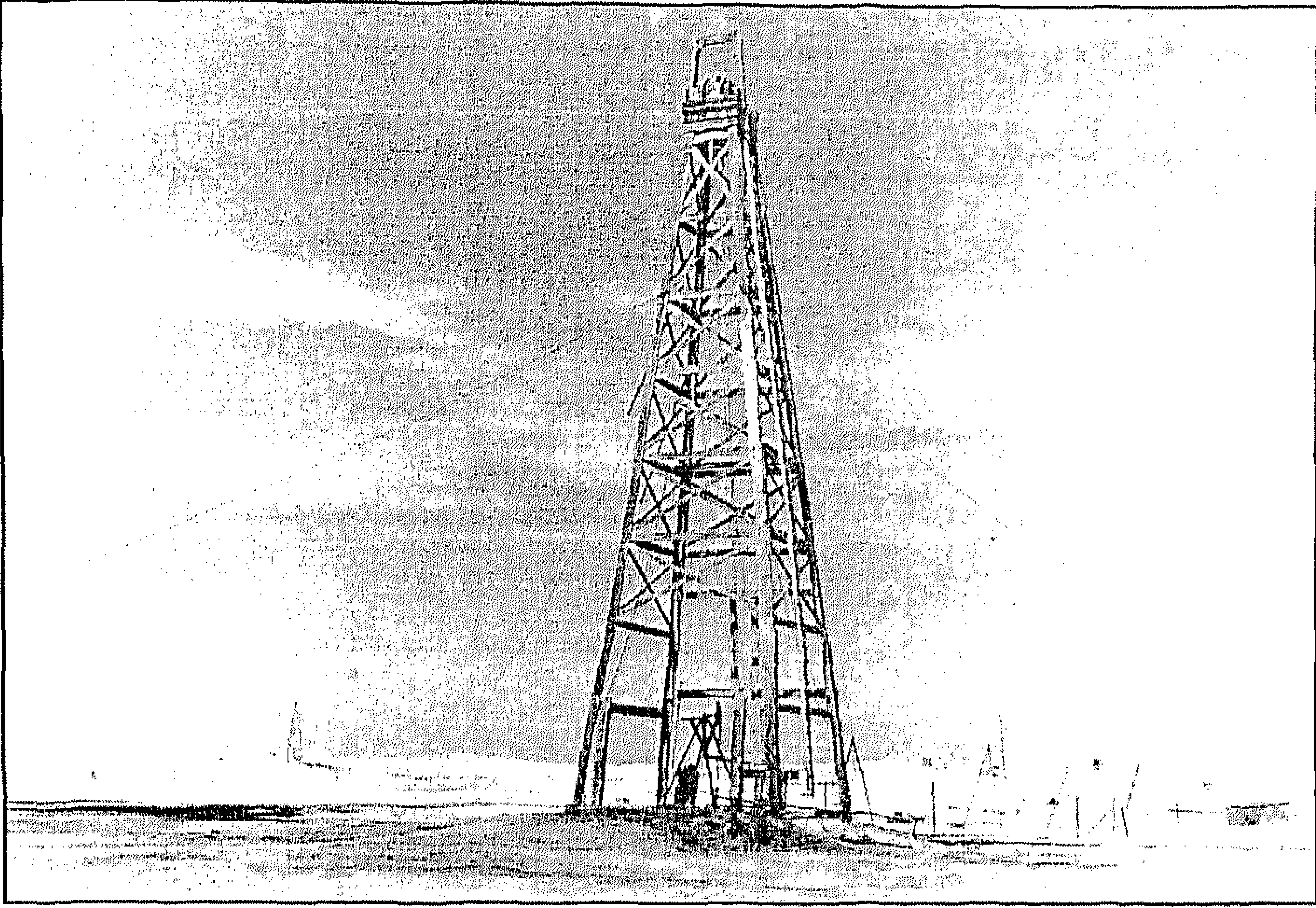
الحفر الوصول إلى عمق ٣٣٩٧ مترا (١١١٤٥ قدماً) في إحدى الآبار التي حفرت بولاية نيويورك الأمريكية عام ١٩٥٣ .

- **الحفر الرحوي:**

بسبب القصور في الحفر الدقاق كان لابد من البحث عن أسلوب أكثر فاعلية حيث كان الحفر الرحوي (الدوار) rotary drilling والذي شاع استخدامه في الوقت الحاضر، وكانت بدايته مع بداية القرن الماضي ويختلف جذرياً عن الحفر الدقاق، وفي الطريقة الجديدة يربط المثقب إلى نهاية سلسلة من الأنابيب الصلبة بدلاً من أن يتحرك صعوداً ونزولاً ويدور بواسطة طاولة رحوية rotary table تدير الأنبوب الأعلى أو عمود الحفر المضلع .

ويظل سائل الحفر drilling fluid أو طين الحفر يسري في البئر بصورة مستمرة نزولا داخل سلسلة أنابيب الحفر الجوفاء وعبر المثقب ثم صعودا إلى السطح عبر الحيز الحلقي annulus بين أنابيب الحفر وجوانب ثقب البئر bore hole، ويجرف سائل الحفر بدورته هذه الحُفارة rock cuttings من داخل البئر فيستغني بذلك عن رفع أدوات الحفر ريثما تنطلق البئر من الحفارة. ثم إن ثقل العمود من شأنه أن يمنع الزيت أو الغاز من الخروج بفعل الضغط فيظل محبوساً في التكوينات التي يكون المثقب قد اخترقها، مقللا بذلك من خطر حدوث انفجار في البئر، وكأي تقنية جديدة لم يتم الاستغناء كلية عن الحفر الدقاق الذي ظل يشارك الحفر الرحوي في عمليات الاستكشاف لفترة زمنية.

كما أن الحفر الرحوي لم يقف أيضاً عند بنيته الأولى ببرجه الخشبي wooden derrick ومرفعه البدائي الذي كان يديره محرك بخاري صغير كما كان الحال في الحفر الدقاق وبين مكوناته الحديثة وضوابطها ومحركات الديزل الكهربائية التي تبلغ قوتها أحيانا ٣٠٠٠ حصان أو تزيد، وسوف نخصص لهذا النوع من الحفر الرحوي فصلاً كاملاً نظراً لأهميته العملية كتقنية متقدمة، ويمثل الشكل ١٣-٢ صورة أرشيفية لبرج حفر خشبي في إحدى الآبار الإنتاجية القديمة بحقل الغردقة والذي تم اكتشافه في مصر عام ١٩١٢ .



شكل ١٣-٢: صورة أرشيفية لبرج حفر خشبي في حقل الغردقة بمصر.

- **الحفر التوربيني:**

هناك طريقة أخرى لحفر الآبار تعرف بالحفر التوربيني turbine drilling وهي طريقة تستخدم في عدد من بلدان أوروبا الشرقية مثل روسيا ورومانيا، وفي هذه الطريقة لا يدور الأنبوب بل يبقى مستقراً. ويدور المثقب دائما في القاع بواسطة محرك يعمل على السوائل أو توربين يستمد قوته من جريان الطين، ومع أن هذه الطريقة تمتاز على طريقة الحفر الرحوي السائدة بسرعة اختراق المثقب للأرض، إلا أن سحب المثقب من البئر يكون ضروريا على فترات قصيرة نسبياً بسبب تثلمه wearing السريع مما يجعل الفاعلية الإجمالية أقل، وخاصة في الآبار العميقة حيث يستخدم الطين الثقيل.

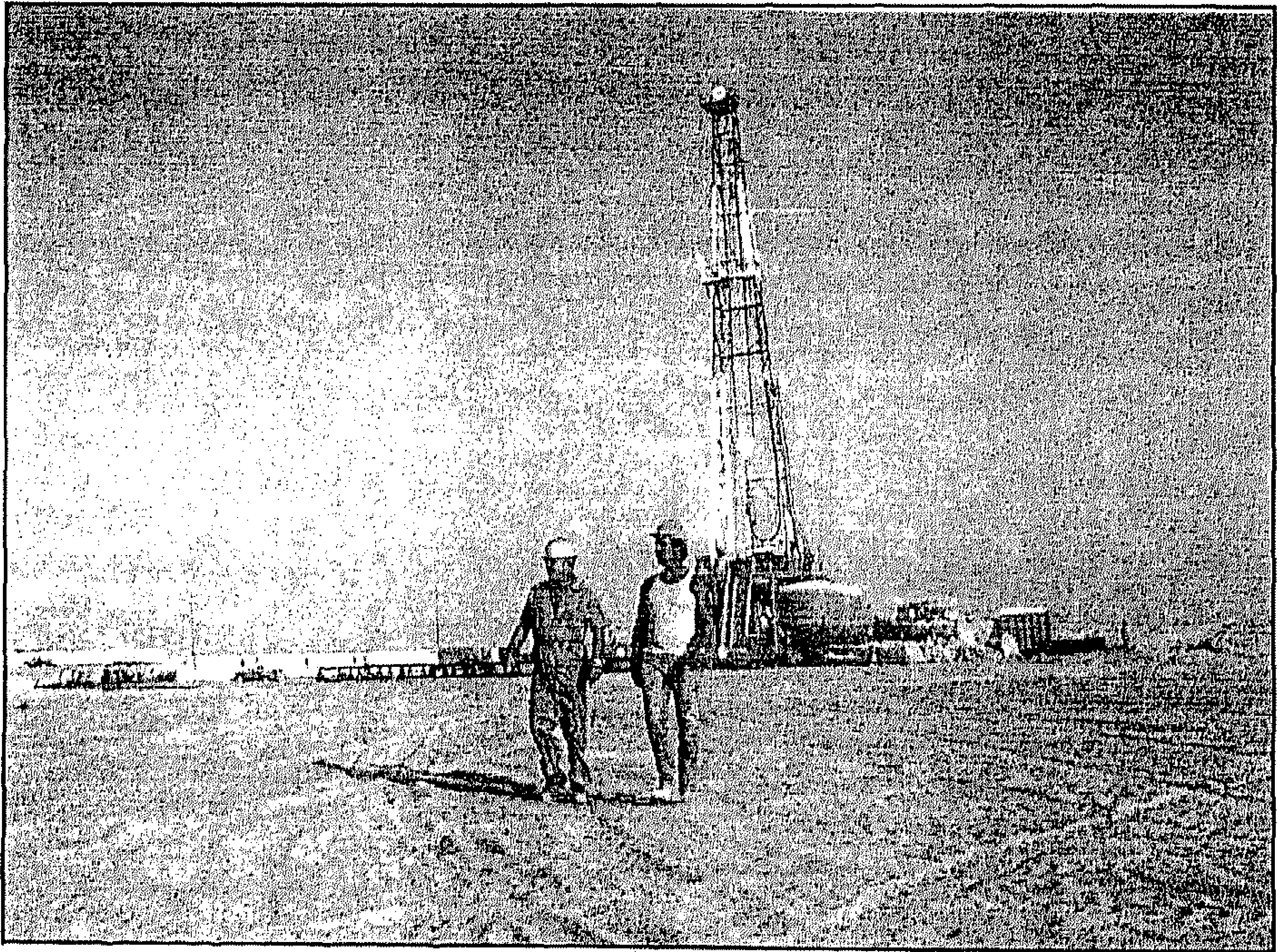
الفصل الرابع عشر

الحفر الرحوي الحديث

تناول الفصل السابق مناقشة تمهيدية للحفر وأوضحنا أهمية هذه التقنية في استكشاف البترول والغاز الطبيعي، كما أوضحنا في إيجاز ما ارتبط بذلك من إجراءات وتشريعات لتنظيم هذا النشاط البالغ الشأن وأخيراً تركز النقاش حول طرق الحفر المختلفة وبينا أن طريقة الحفر الرحوي هي الأكثر شيوعاً في الآونة الحالية وأكثرها فاعلية في الأداء؛ لذا رأينا أن يكون هذا الفصل الجديد مكرساً لهذه الطريقة وما يرتبط بها من أساليب وإجراءات تقنية في الأعمال البرية والبحرية على حد سواء.

جهاز الحفر الرحوي الحديث ومكوناته الرئيسة:

يتكون جهاز الحفر الرحوي (الدوَّار) rotary drilling في جوهره من المثقب، وسلسلة أنابيب الحفر، والمعدات الرحوية، والمعدات الرافعة، ومعدات ضخ سائل الحفر، والمحركات الأساسية وجهاز نقل الحركة، وجهاز للتحكم في الضغط (شكلا ١٤-١ و١٤-٢)، وفيما يلي شرح مبسط لكل مكون على حدة.



شكل ١٤-١: منظر عام لجهاز حفر رحوي بأحد المواقع بالصحراء الغربية لمصر.

أ
ب
ج
د
هـ
و
ل
موقع الحفار
ك
م
ن
ع
ز
ح
ي
س
ف

أ بكارة رئيسية خماسية
ب بكارة متحركة رباعية
ج خطاف
د وصلة متراوحة
هـ عمود الحفر المضلع
و ماسورة قائمة وخرطوم رحوي
ز قاعدة برج الحفر
ح آلة رحوية
ي الدفع الآلي الرحوي من ناقل الحركة الرئيسي
ك شبكة طينية
ل مخرج لسائل الحفر
م الأجهزة الرافعة
ن المحركات الرئيسية
س ناقلة الحركة الرئيسى (محركات السحب والضخ)
ع خزان المص
ف مضخة

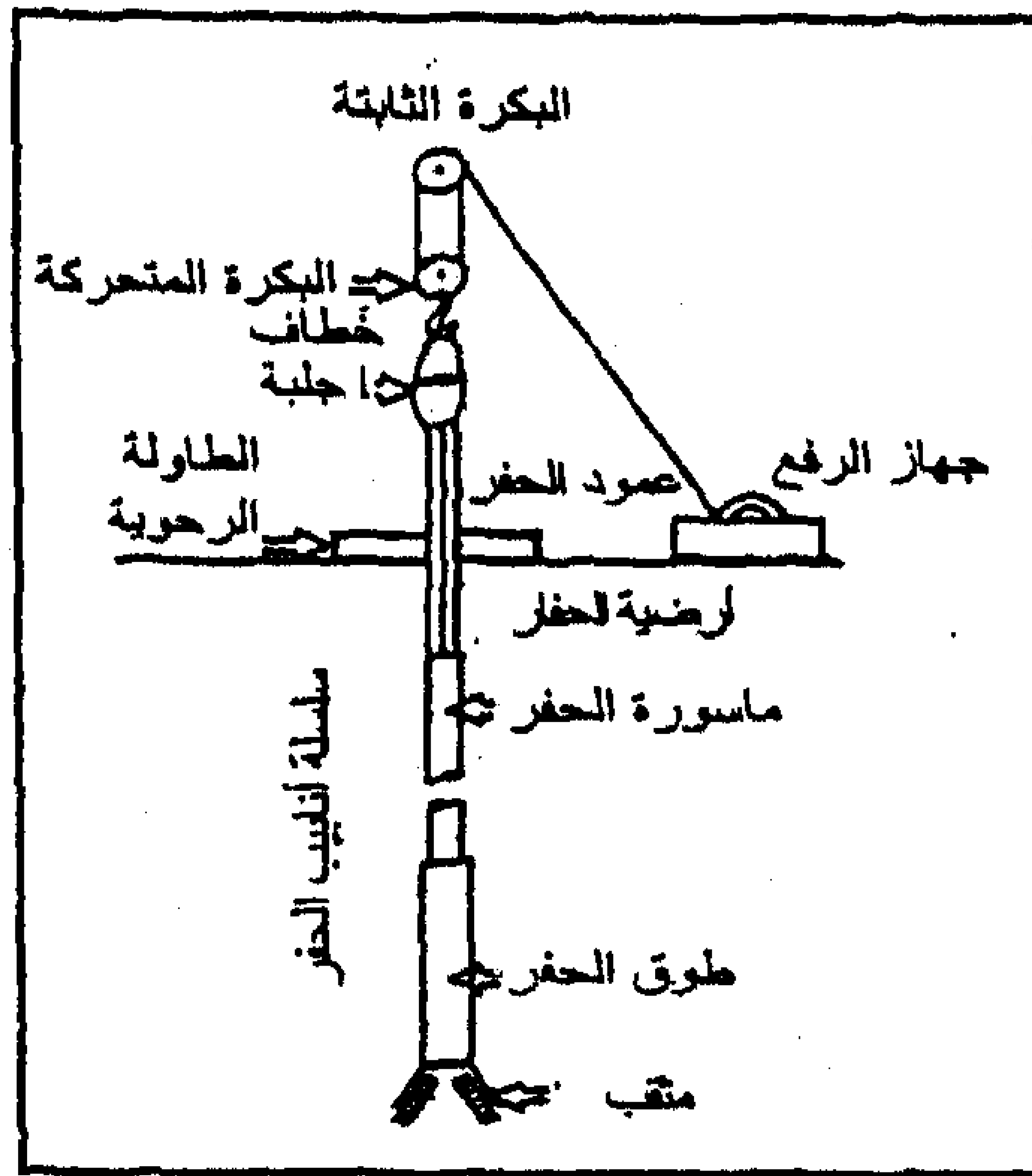
تدفق سائل الحفر ←

شكل ١٤-٢: رسم تخطيطي يوضح المكونات الرئيسة لجهاز الحفر الرحوي.

المثقب وسلسلة أنابيب الحفر:

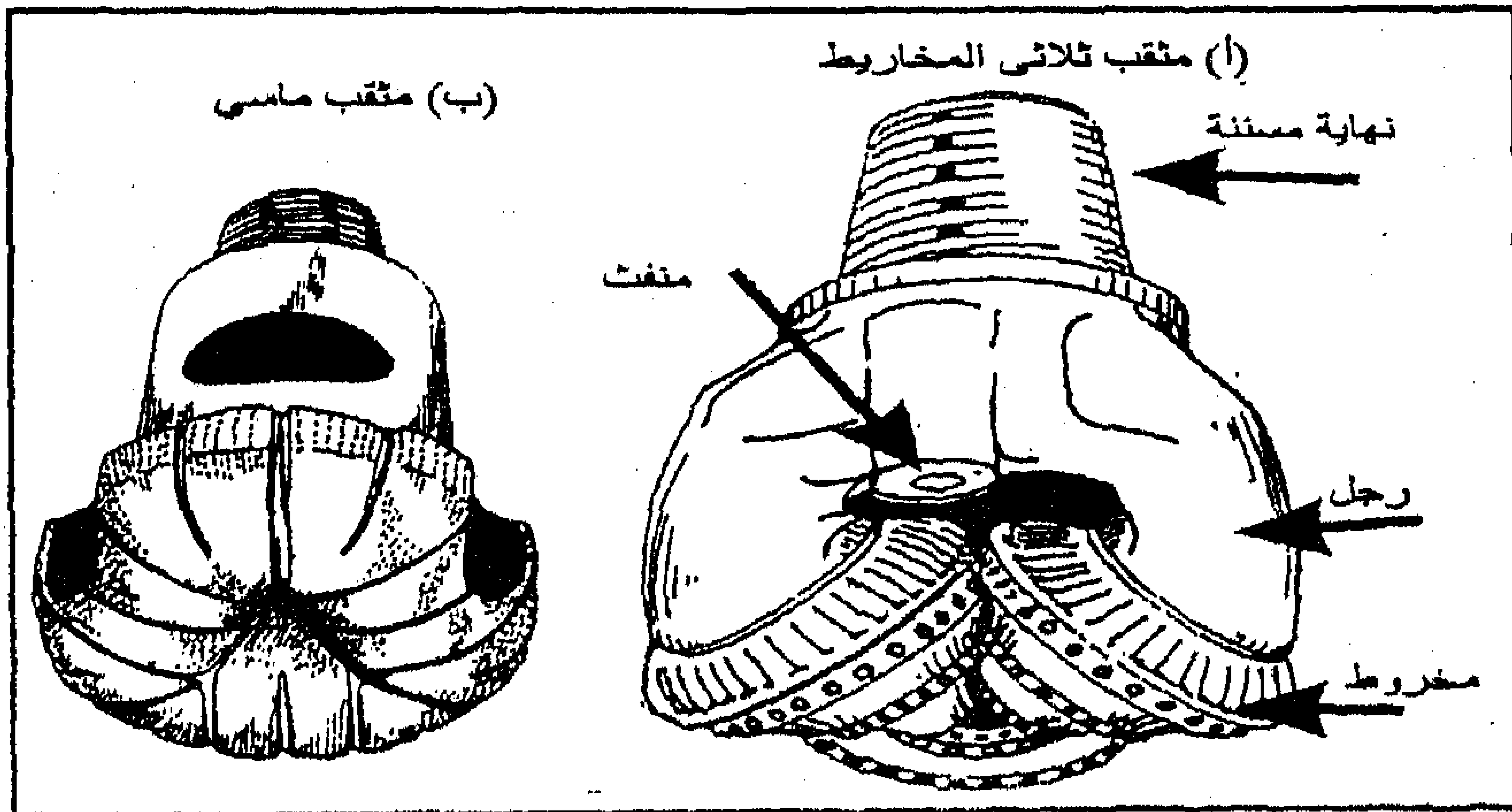
المثقب أو الدقاق bit هو رأس الحربة في جهاز الحفروهو يشق طريقه إلى أعماق بعيدة تحت سطح الأرض مخترقاً تكوينات وصخوراً متباينة في صلابتها من الرخوة إلى الشديدة الصلابة، ويثبت المثقب بطرف سلسلة أنابيب الحفر drilling string المصنوعة من صلب خاص طول الواحدة منها عشرة أمتار (٣٠ قدم) وقطرها في العادة خمس بوصات وأحياناً ٣.٥ بوصة أو أقل، ويتم توصيل هذه الأطوال بشكل محكم مانع للتسرب كما يمكن فكها أو تركيبها مرة أخرى بسرعة وأمان، هذا وتصنع المثاقب بأقطار تتراوح بين ٩.٥ – ٦٦ سم (٣.٧٥ – ٢٦ بوصة)، وتدار بمعدل ٥٠ – ١٠٠ لفة في الدقيقة. وتمر الوصلة الأولى والتي تعرف بعمود الحفر المضلع kelly عبر طاولة رحوية rotating table تدور حول نفسها فتنقل القوة أو عزم اللي أو الدورات من الآلات الرحوية إلى سلسلة أنابيب الحفر ومنها إلى المثقب، ويصنع عمود الحفر المضلع على هيئة مضلعة رباعية أو سداسية الشكل وهي من الصلب العالي الجودة ويبلغ طولها ما بين ١٤ – ١٦.٥ متر (٤٠ أو ٥٤ قدماً) وتربط بالطاولة الرحوية مجموعات من البكرات لها بيت خاص يدعى جلبة عمود الحفر المضلع kelly bushing، وتشكل مجموعات البكرات الموجودة داخل الجلبة فتحة ذات شكل مربع أو مسدس يمر عبرها عمود الحفر المضلع الذي يدور مع الطاولة وهكذا يتيسر لعمود الحفر دفع يكاد يكون خالياً من الاحتكاك عندما يتم إنزاله ويبدأ الحفر.

ويوجد عند الطرف الأسفل من سلسلة أنابيب الحفر فوق المثقب مباشرة مواسير ثقيلة سميكة الجوانب تسمى أطواق الحفر drilling collars (شكل ١٤–٣) وهذه تساعد على انضباط الحفر وتجنب سلسلة الأنابيب من الالتواء أو الكسر وقد يتراوح عدد هذه الأطواق ما بين ٢ أو ٢٠ طوقاً، والواقع أن أجزاء سلسلة أنابيب الحفر يجب أن تكون مصنوعة من أجود المواد وبمنتهى الإتقان حتى تستطيع تحمل الإجهادات الشديدة التي تقتضيها أعمال الحفر.



شكل ١٤-٣: رسم مبسط يوضح النظام الرحوي.

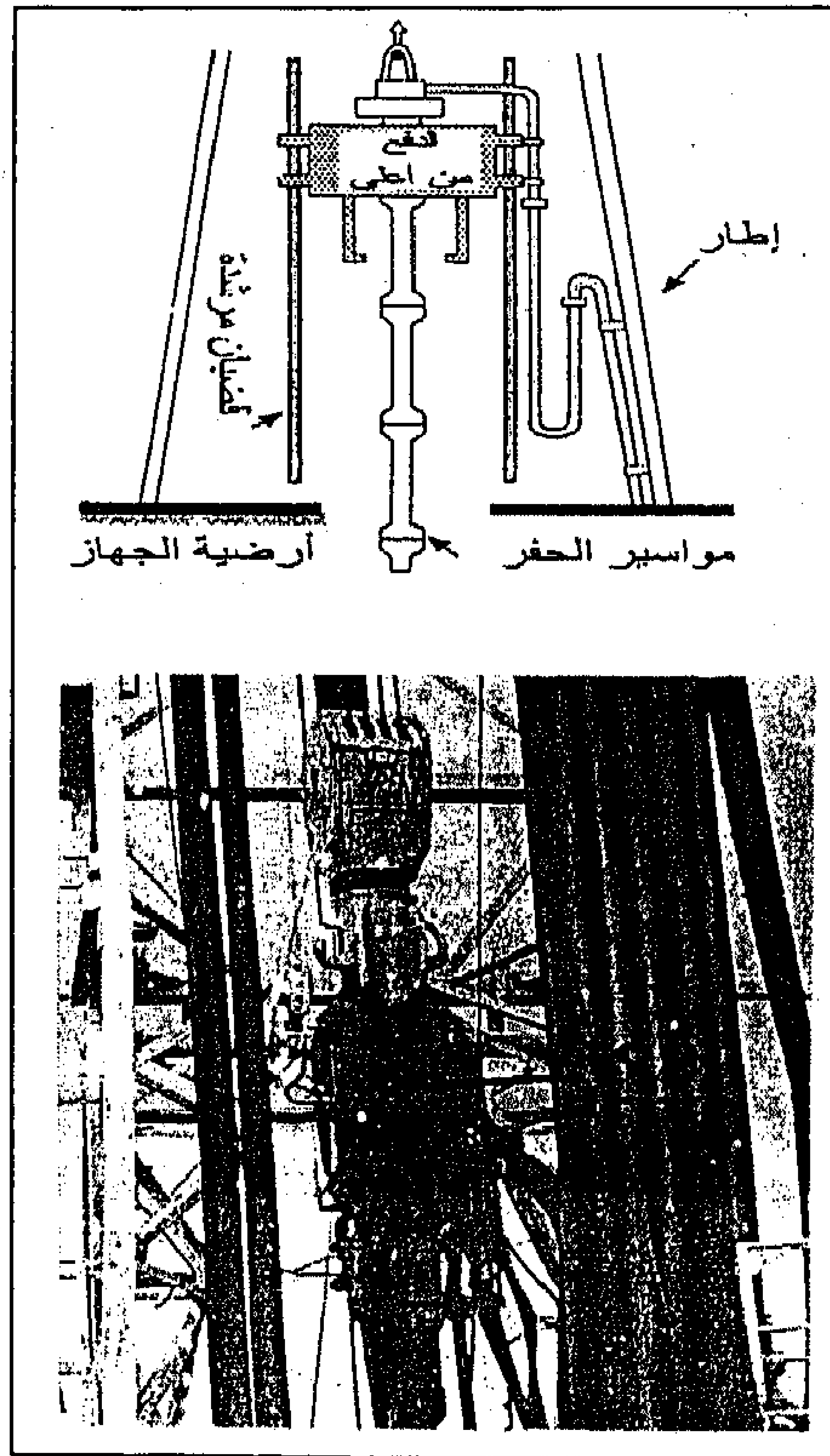
ويعتبر المثقب ثلاثي المخروطات tricone bit (شكل ١٤-٤أ) من أكثر المثاقب شيوعاً واستخداماً وحيث تكون المكونات رخوة تزود مخروطات المثقب بأسنان قليلة وطويلة في حين تستعمل في الصخور الصلبة الأسنان القصيرة، كذلك فهناك المثاقب المرصعة بحشوات من مادة كربيد التنجستين الشديد الصلابة بدلاً من تلك الأسنان، وهناك أيضاً المثقب المرصع بقطع الماس diamond bit (شكل ١٤-٤ب) ذو القدرة العالية في التعامل مع الصخور الجيرية ويتزايد الإقبال عليه نظراً لكفاءته العالية في الاختراق وطول عمره عند الاستخدام وهو مناسب كثيراً للحفر التوربيني والتعامل مع الصخور الجيرية.



شكل ١٤-٤ : مثاقب الحفر المختلفة.

ومع الوقت يتباطأ الحفر بسبب تراكم الحُفارة الصخرية في قعر البئر مما يلزم عملية تنظيف ولهذا الغرض يزود المثقب بمنفث نافوري nozzle jet يقذف سائل الحفر في داخله بسرعة عالية حيث تؤدي هذه الحركة النافورية إلى تنظيف البئر ورفع الحُفارة مع سائل الحفر مع استمرار دورة هذا السائل إلى المثقب ومنه.

وتزود أجهزة الحفر الحديثة بجهاز آلي يقوم على استبدال الحركة الدوارة عن طريق الطاولة الرحوية بآلية دفع جديدة top drive تعتمد على محرك هيدروليكي أو كهربائي موجود أعلى برج الحفر أسفل البكرة الدوارة ويتحرك إلى أعلى وإلى أسفل على قضبان خاصة (راجع الشكل ١٤-٥). ويولد هذا المحرك طاقة بقدرة ١٠٠٠ حصان أو أكثر، وبواسطة هذه الآلية فإنه يمكن الحفر باستخدام عمود حفر stand بطول ٣٠ متراً (٩٠ قدماً) في آن واحد مما يوفر الوقت الذي يضيع في ربط وصلات أنبوب الحفر، كما يمكن إدارة هذا العمود أثناء سحبه من البئر مما يساعد أيضاً على تقوير وتوسيع البئر وتنظيفها من الكسارة والحفارة الصخرية، وهو ما يعمل على تقليل تكلفة الحفر.



شكل ١٤-٥: آلية الدفع من أعلى أثناء الحفر.

المعدات الرافعة:

عندما يهترئ المثقب أو يثلم تستخدم معدات رافعة hoisting equipment لسحب سلسلة الأنابيب من البئر ثم إنزالها بعد تركيب مثقب جديد في أسفلها ويستخدم برج الحفر derrick الذي يبلغ طوله ما بين ٢٩ و٥٧ متراً لدعم مجموعة البكرات والكبلات المستخدمة لهذا الغرض (راجع شكل ١٤-٢) ويتم سحب السلسلة برافع كل ثلاثة مقاطع بطول الواحدة منها ١٠ أمتار (٤٥ قدماً) تعرف بالوصلات joints حيث يسحب هذا العمود البالغ ٣٠ متراً (٩٠ قدماً) من الأنابيب إلى جانب البرج حيث يرصف حسب طريقة مقررة بحيث يبقى مأموناً وبمنأى عن الطريق في أثناء سحب العمود التالي ثم تسحب على التوالي أعمدة أو أطوال أخرى من البئر وترصف جميعاً بطريقة مماثلة، وبعد سحب جميع أطوال الأنابيب وأطواق الحفر من البئر يتجمع على البرج وعلى المنصة وزن كبير من الأنابيب ولذلك يجب تصميم البنيان بمجمله بحيث يكون قادراً على حمل هذه الأثقال، ويبلغ العمر الافتراضي للمثقب بعد ٨ إلى ٢٠٠ ساعة دوران وبمتوسط حوالي ٢٤ ساعة ويمكن إدراك ذلك من الضوضاء التي تحدثها سلسله أنابيب الحفر على أرضية البرج بالإضافة إلى ما يلاحظ من بطء شديد في معدل الاختراق penetration rate.

وفي أجهزة الحفر العميق قد تبلغ طاقه جهاز الدفع الجبار الذي يستخدم في إنزال الأنابيب في البئر وإخراجها منها ٥٠٠ طن أو أكثر ويتكون الجهاز من نظام رافع hoisting system من مجموعة بكرات ثابتة في رأس البرج (البكرة الرئيسة) crown block وبكرة عمل كبيرة (البكرة المتحركة) travelling block ذات خطاف hook معلق بها ويتصل هذا الخطاف بوصلة دوارة swivel تسمح لسلسلة الأنابيب بالدوران (راجع شكلي ١٤-٢ و١٤-٣) وحول أسطوانة الرفع حبل ملفوف hoisting line من السلك الصلب المتين المرن يتراوح قطره بين بوصة وبوصة ونصف البوصة يمر في البكرة الرئيسة والبكرة المتحركة ويربط طرف الحبل المقابل للمرفع بقاعدة البرج ويلحق به جهاز يقيس الإجهاد الذي يتعرض له الحبل فيسجله على ميزان أنابيب الحفر الموضوع قرب الحفار، ويشير هذا الميزان إلى الوزن المتدلي من الخطاف وإلى الثقل الواقع على المثقب في أثناء الحفر وتضع هذه الآلة سجلاً شاملاً لأعمال الحفر إذ إنها تواصل تسجيل الأعمال على خريطة بيانية متحركة.

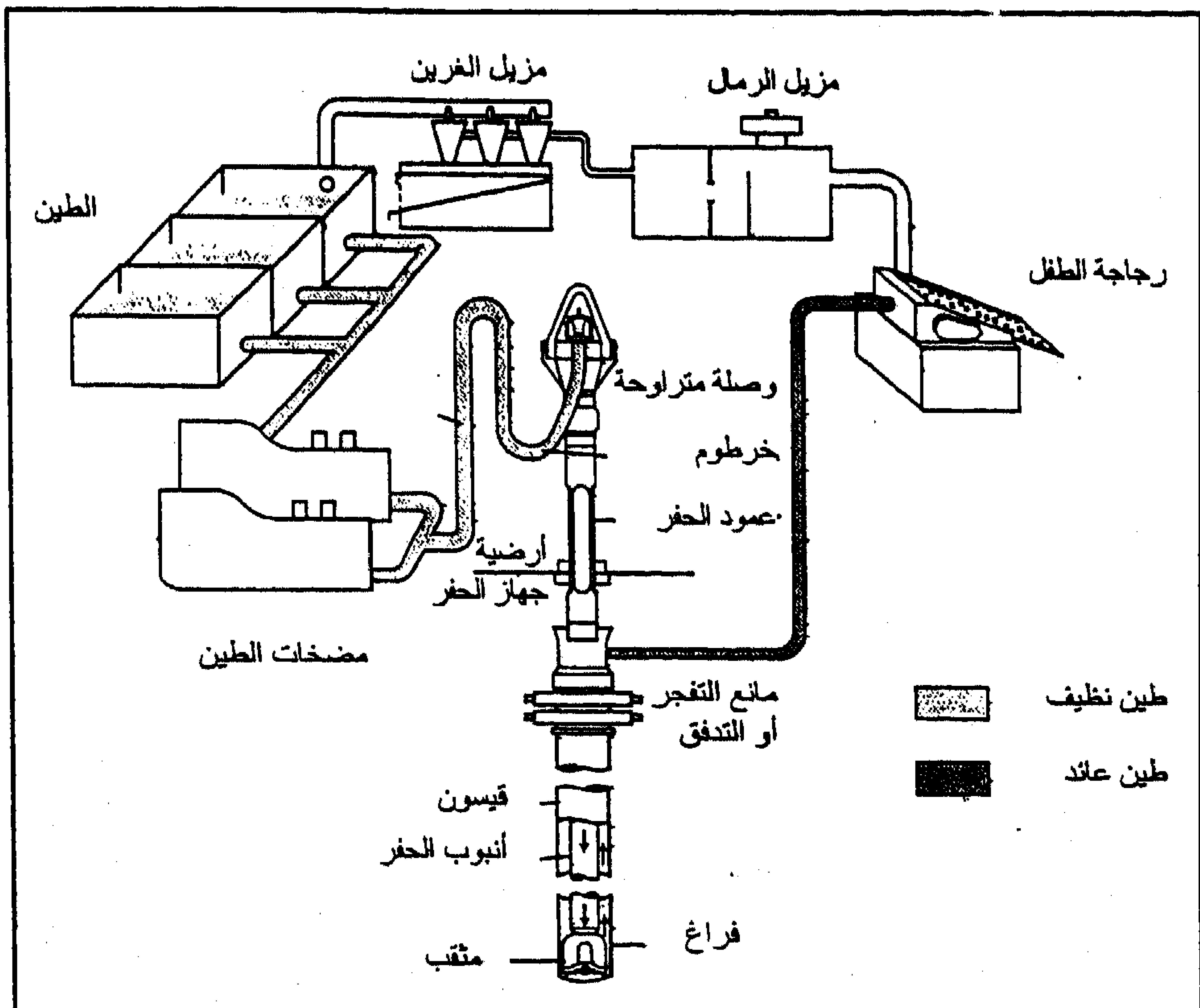
ويثبت الجهاز الرافع draw works بإحكام عند مستوى أرضية البرج وهو يتكون من أسطوانة من الصلب وأعمدة وسلاسل وعجلات مسننة وقباضات الغاية منها تهيئة قوة للدفع على نسب بديلة مختلفة، ويحتوى الجهاز الرافع أيضاً على آليات للفرملة تحت جهاز التحكم اليدوي الذي في متناول الحفار كما يحتوي على حافظات أعمدة لتشغيل آلات مناولة الأنابيب ولوحة مجمع زيت الآلات وأذرعة التحكم ومقابض تشغيل المحركات والأجهزة الرافعة سواء باليد أو بالكهرباء أو بالهواء المضغوط.

الجهاز الرحوي (الدوَّار):

يدار عمود الحفر المضلع وبالتالي سلسلة أنابيب الحفر بواسطة الآلة الرحوية rotating system (راجع شكلي ١٤-١ و١٤-٣) الموضوعة في وسط أرضية برج الحفر عن طريق جلبة عمود الحفر المضلع، وتدور الطاولة رحوياً عبر ترس لتخفيض السرعة بواسطة محرك كهربائي أو بأسلوب آخر، ويتدلى عمود الحفر المضلع وسلسلة أنابيب الحفر من الخطاف المعلق أسفل البكرة الدوارة بواسطة الوصلة الدوارة (المتراوحة) swivel أما وزنها فتتحمله محامل دفع كرارة ثقيلة من خلال الوصلة المتراوحة مما يتيح لها الدوران حتى تحت أحمال ثقيلة وتجري حركة دوران الطاولة والعمود المضلع والجلبة كوحدة واحدة وفي اتجاه عقارب الساعة.

دورة سائل الحفر:

يتم حفر البئر في وجود سائل يعرف بسائل الحفر drilling fluid أو طين الحفر drilling mudويضخ هذا السائل تحت ضغط عال من خزان الطين mud tank (سعة حوالي ٤٠ متراً مكعباً) والموجود بجوار برج الحفر صعوداً في ماسورة قائمة عند زاوية البرج وعبر الخرطوم الدوار hose والوصله المتراوحة swivel إلى عمود الحفر المضلع الأجوف وسلسلة أنابيب الحفر (راجع شكلي ١٤-١ و١٤-٢)، وبعد أن يغادر السائل مثقب الحفر حاملاً معه الحفارة cuttings يصعد إلى السطح عبر الحيز الحلقي annulus بين سلسلة أنابيب الحفر وجوانب ثقب التجويف، وعند رأس البئر يمر السائل بغربال سريع الاهتزاز يعرف برجّاجة الطفل shale shaker فيحتفظ هذا بمعظم الحُفارة ويعود السائل إلى خزان المص suction tank وغالباً ما تكون العودة عن طريق خزان وسيط يستعمل لأغراض المعالجة (شكل ١٤-٦).



شكل ١٤-٦: نظام دورة سائل الحفر والمكونات الرئيسة.

وأهم ما في جهاز دورة سائل الحفر circulating system مضخة الطين mud pump وهي عبارة عن مكبس ثنائي أو ثلاثي ترددي ولابد أن تكون المضخة فائقة المتانة في صنعها وقادرة لا على الاستمرار في الخدمة تحت أحمال ثقيلة فحسب، بل وكذلك على تصريف السوائل الممتلئة بالرمل والحُفارة، ومن الشائع أن تبلغ طاقة المضخة ١٠٠٠ حصان أو أكثر، وتعمل بضغوط تتراوح بين ٢٥٠٠ و٣٠٠٠ رطل على البوصة المربعة. إن تعطل المضخة خلال الحفر قد يسفر عنه عواقب خطيرة منها خسارة قسم من البئر على الأقل.

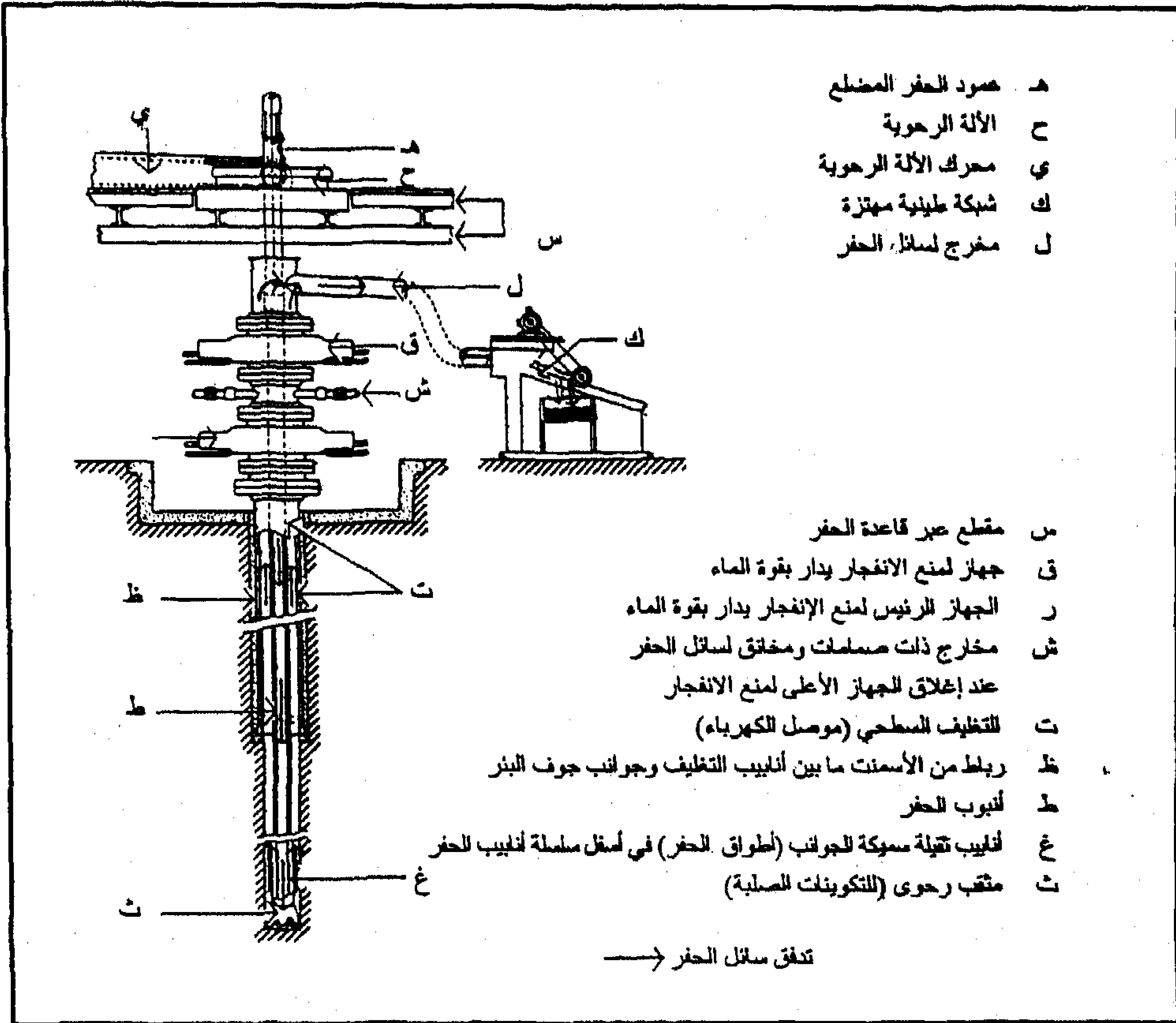
المحركات الأساسية:

يعمل جهاز الحفر وملحقاته بواسطة مجموعة من المحركات الأساسية prime movers التي تشكل مصادر الطاقة المحركة، وفي الماضي كان المحرك البخاري شائع

الاستخدام غير أن ذلك قد بطل كلية فقد حلت محركات الديزل أو تلك التي تدار على الغاز أو تلك التي تعتمد على المصادر الكهربائية، وفي الحفر الثقيل يكون جهاز توليد الطاقة من ثلاثة أو أربعة محركات طاقة الواحد منها ٥٠٠ حصان وربما أكثر وتربط هذه المحركات بعضها ببعض شبكة من أجهزة نقل الحركة والقابضات وغيرها بما في ذلك نقل القوة المولدة إلى مضخات الطين.

مانعات التدفق والثوران:

عند رأس البئر وأسفل أرضية برج الحفر توجد شبكة من معدات خاصة تعرف بمانعات التدفق أو التفجر blow out preventors (BOP)، وقد تتعرض البئر أثناء حفرها إلى عدد من المشكلات والمخاطر والتي ينبغي معالجتها بحرص ومهارة، فمثلاً يتمدد الغاز لدى الصعود به إلى سطح البئر ومن السهل لذلك أن يقذف بقسم من عمود السائل الحلقي، كذلك يمكن للمثقب عند سحبه بسرعة من البئر أن يتسبب في حركة نزح شديدة تؤدي إلى دخول الغاز أو سائل آخر إلى فتحة البئر، كما يمكن على أعماق سحيقة مصادفة الزيت أو الغاز أو الماء والانطلاق بصورة مفاجئة إلى أعلى البئر، واستعداداً لهذه الأمور الطارئة كان من الضروري إقامة مانعات التدفق عند رأس البئر وتستطيع هذه المعدات أن تسد الفراغ بين أنابيب الحفر والقيسون في أقل من ١٥ ثانية، وأن تتحمل من الضغط ما قد يبلغ ٥٠٠٠ رطل على البوصة المربعة أو أكثر حسب حجمها وطاقتها وتعمل هذه المانعات بالضغط السائلي الذي يقع على مكابس متقابلة أفقياً فتتقارب بذلك وتطبق على عمود الحفر وتحيط به إحاطة محكمة وتسد فتحة البئر كلها إذا ما أصبح الأنبوب خارج البئر، والشكل ١٤-٧ يبين مقطعاً تخطيطياً للمعدات تحت قاعدة البرج وجوف البئر وسلسلة أنابيب الحفر والأسهم توضح كيفية تدفق سائل الحفر من قاع البئر إلى خارجها، وتجدر الإشارة إلى أن حوادث تفجر آبار البترول والغاز الطبيعي (شكل ١٥-٢) قد تكون ذات عواقب وخيمة وكارثية وربما استغرق مكافحتها وإخمادها أياماً وشهوراً بل وسنوات ومن هنا ندرك أهمية وجود مانعات التفجر والتأكد من أداء مهمتها بنجاح، كما سوف نرى في الفصل ١٧.



شكل ١٤-٧: مقطع تخطيطي للمعدات تحت قاعدة البرج وجوف البئر وسلسلة أنابيب الحفر.

عمليات الحفر:

- **طاقم الحفر drilling crew:**

علمنا أن الحفر عملية مكلفة للغاية لذا وجب تناولها وإدارتها بحرفية كبيرة ويتحقق ذلك من خلال فريق عمل متكامل، وحفر البئر عملية متواصلة ليل نهار وتستمر عادة دون انقطاع منذ اللحظة الأولى لبدئها وحتى إنجازها، ويتعاقب على العمل تحت إشراف مراقب للحفر tool pusher ثلاث فرق تضم كل واحدة منها حفَّاراً driller وأربعة عمال على ثلاث نوبات shifts تعمل كل منها ثماني ساعات، ويتولى فني ميكانيكي mechanic أمر المحركات كما يقوم مراقب الحفر بكتابة تقرير يومي يدون به الإنجازات التي تمت خلال الساعات الـ ٢٤ المنصرمة ويقدمه إلى كبير الحفارين (مشرف عام الحفر) drilling

superintendent، يشمل التقرير عدد الأمتار أو الأقدام التي حفرت والوقت الذي استغرقته الأنشطة المختلفة والمواد والكيماويات التي استخدمت وكذا المعلومات الجيولوجية والتحتسطحية الواردة من البئر، كما عليه أن يتحقق من أن المواد التي سبق طلبها قد وصلت إلى الموقع في حينه وتم استخدامها على أنفع وجه، أما المشغل operator فيطلق على الشركة التي تنظم عملية الحفر وتقوم بالتمويل المالي اللازم كما أنها أيضاً هي التي تختار موقع الحفر وتقوم بالتعاقد مع المقاولين لتسيير عملية الحفر، وللشركة المشغلة من يمثلها على الموقع ويسمى ممثل الشركة company representative or company man وهو مقيم في موقع البئر ويتخاطب مع مراقب الحفر للتأكد من أن عملية الحفر تسير حسب المواصفات المعتمدة وهو المسئول أيضاً عن التقرير اليومي الذي يرفعه إلى إدارة الشركة في هذا الشأن.

ولا ينبغي أن نغفل دورعامل البرج derrick man بالرغم من مستواه الوظيفي البسيط مقارنة بأفراد فريق العمل الآخرين فهو يقوم بمتابعة العمل على جهاز الحفر أثناء نوبات العمل كما يراقب سير دورة سائل الحفر، كما يوجد على الجهاز اثنان إلى أربعة من المساعدين roughnecks or rotary helpers للمحافظة على تداول وتناول المعدات بشكل آمن، كما يوجد على الأجهزة الكبيرة شخص motorman مسئول عن المحركات الأساسية.

ومن ناحية أخرى هناك مهندس أو جيولوجي موقع البئر أو باختصار مهندس أو جيولوجي البئر well-site engineer or geologist ويدخل ضمن واجباته متابعة كافة الأنشطة على الموقع والتأكد من أن تنفيذ برنامج الحفر يسير حسب الخطة وله أن يفحص مادة الحُفارة والعينات المستخرجة من البئر قبل أن يرسلها إلى المعمل لفحصها بمزيد من التفاصيل وله أن يشرف على اختبارات الإنتاج في الطبقات التي يمكن أن تكون منتجة، وأن يختبر سائل الحفر من وقت لآخر للتأكد من ثبات تركيبه وتأديته للعمل على الوجه المطلوب ولإعطائه أي معالجة كيميائية أو ميكانيكية، وفي المعالجات الكيميائية يكون دور مهندس الطين mud engineer كبيراً للغاية ذلك أن من شأن الطين إذا أهمل أو عولج معالجة غير صحيحة أن يعيق التقدم جدياً بل قد يؤدي إلى فقدان التحكم في البئر أو التصاق الأنبوب أو إلى أخطار جدية مماثلة.

رحلة الحفر:

رحلة الحفر هي رحلة ذهاب وإياب (إنزال وصعود) tripping in & out وتكون بدايتها بإنزال سلسلة أنابيب الحفر إلى قاع البئر وربط عمود الحفر المضلع حيث يبدأ تشغيل مضخات الطين واذا ما تبين أن الطين ينساب بشكل جيد ومنتظم في دورته يبدأ تشغيل الطاولة الرحوية ويشرع في إنزال الأنبوب شيئاً فشيئاً حتى ينزل القسم الأعظم من طول العمود المضلع إلى أن تظهر أول وصلة للمعدات فوق الطاولة الرحوية فتدق في الفتحة عندئذ أوتاد (كلابات) من حول أنبوب الحفر لتحمل ثقل سلسلة أنابيب الحفر وهذه الأوتاد تستقر في فجوات مطابقة لها في الطاولة الرحوية تسمى جلبة الطاولة وعندئذ يفك عمود الحفر المضلع بواسطة ملاقط تدار ميكانيكياً ويوضع عند أحد جوانب برج الحفر وتركب وصلة من أنابيب الحفر طولها ١٠ امتار (٣٠ قدماً)، ثم يعاد عمود الحفر المضلع إلى مكانه ويستأنف الحفر، ومن وقت لآخر يتم سحب سلسلة الأنابيب خاصة وعند الحاجة إلى استبدال المثقب وتفكك السلسلة إلى مقاطع طول كل منها ٣٠متراً (٩٠ قدماً) وتصفف في وضع قائم تقريباً عند أحد جوانب أرضية برج الحفر بمساعدة عامل البرج ثم يعاد إنزالها من جديد، ويطلق على رحلة الإنزال tripping in وعلى رحلة السحب tripping out، وعملية الذهاب والإياب مضنية وطويلة بالرغم من وسائل المناولة الفعالة والمعدات القوية، وقد يستغرق سحب سلسلة الحفرمن على عمق ٣٠٠٠ متر (١٠٠٠٠ قدم) نحو ٥- ٦ساعات ويستغرق إعادتها ٣- ٤ ساعات، أما الفرق في الوقت فهو ناشئ عن البطء في رفع أنابيب الحفر الثقيلة (حوالي ١٠٠ طن) في المراحل الأولى من السحب.

سائل الحفر ووظائفه:

لا يدخل سائل الحفر drilling fluid أو كما يسميه البعض طين الحفر drilling mud بالطبع ضمن المكونات الأساسية لجهاز الحفر ولكنه أحد العناصر الرئيسة لإنجاز عملية الحفر، فالتقدم والفعالية في أعمال الحفر يتوقفان إلى حد بعيد على استخدام سائل الحفر المناسب للصخر الذي يجري فيه الحفر ويتكون في العادة من مواد صلصالية غروية معلقة في الماء مع مواد كيميائية تضاف إليها للتحكم في اللزوجة وغيرها من الخواص، وإذا كان الماء هو الذي يشكل أساس طين الحفر سمي طين الحفر ذو القاعدة المائية water-based

drilling mud، أما إذا كان الطين مؤسساً على الزيت سمي طن حفر ذو قاعدة زيتية -oil based drilling mud، ويستخدم هذا النوع من طين الحفر إذا كان الحفر يجري في تكوينات حاملة للزيت منخفضة الضغط غير أنه في حالات خاصة يمكن استخدام الهواء أو الغاز، أما في الآبار الشديدة العمق حيث ترتفع الحرارة لتبلغ ٢٠٠ درجة مئوية (٤٠٠ درجة فهرنهيت) أو أكثر فيجب أن يبقي الطين في حالة سائلة، وبصورة عامة فإن طين الحفر الشائع الاستخدام هو مزيج من الماء والبنتونيت bentonite وهو نوع من الصلصال له خاصية غروية ويبقى معلقاً في الماء لفترة طويلة بعد توقف خضخضته. وإذا تم إضافة المزيد من البنتونيت إلى سائل الحفر فإن ذلك يعمل على زيادة لزوجة الطين وعلى النقيض فإن إضافة الماء يقلل من لزوجة المستحلب، كذلك قد يحتاج طين الحفر إلى إضافة بعض المواد الكيميائية additives حيث يعمل كل من الباريت ($BaSO_4$) والجالينا (PbS) على رفع ضغط عمود الطين داخل ثقب الحفر وتسمى هذه المواد المضافة مواد التثقيل weighting materials، ويوصف في العادة سائل الحفر بمقدار وزنه، فالماء العذب يزن ٨.٣ رطل/ جالون والبنتوتيت يزن ما بين ٩-١٠ رطل/ جالون أما الطين الثقيل فإنه يزن ما بين ١٥ إلى ٢٠ رطلاً/ جالون.

وعلى موقع البئر يجري بين الحين والحين قياس لكثافة ووزن سائل الحفر ودرجة لزوجته وبعض الخواص الأخرى له وذلك بهدف التأكد من أن هذا السائل محتفظ بمواصفاته وربما إحتاج إلى معالجة، ويقوم بهذه المهمة مهندس تابع للشركة المقاولة هو مهندس الطين، وتقدم هذه الشركة خدماتها في هذا المجال للجهة المالكة أو المشرفة على موقع الحفر.

ويجري بين الحين والحين قياس لكثافة ووزن الطين ودرجة لزوجته وبعض الخصائص الأخرى له للتأكد من احتفاظ هذا السائل بالمواصفات المطلوبة، ويعتبر قمع مارش Marsh funnel من الأدوات المستخدمة بالحقول في قياس لزوجة الطين ويقوم القياس على حساب الزمن الذي إستغرقه سائل الحفر للمرور خلال هذا القمع مقدراً بالثانية، وبعملية معايرة بسيطة يمكن حساب لزوجة السائل، أما في المعمل فهناك جهاز اللزوجة viscometer والذي يقيس أيضاً قوة الجل (الهلام) gel strength والتي تعرف بقدرة سائل الحفر على إبقاء المواد الصلبة معلقة به، كما أن اختبار الترشيح filtration test

باستخدام مكبس الترشيح filter press ومنه معرفة سمك قشرة الطين mud cake thickness المتبقية على ورقة الترشيح ومدى تجانسها وكذا قياس كمية الراشح filtrate الذي مر من خلال المرشح filter، كما أن قياس درجة القلوية alkalinity أو الرقم الهيدروجينيpH ومحتوى المكونات الصلبة من الطين من الأشياء التي يجري قياسها بصفة روتينية وتدوينها بتقرير الحفر، ولما كان سائل الحفر يتم نقله إلى الموقع وضخه داخل البئر ثم التخلص منه بعد الانتهاء من مهمته بكمياته الضخمة كان لا بد أن يكون هذا السائل صديقاً للبيئة وغير ملوث لها وأيضاً رخيصاً في سعره وتكلفته.

ونظراً للأهمية البالغة لسائل الحفر فإنه من المفيد أن نسجل فيما يلي الوظائف الرئيسة له:

- إزالة الحُفارة الصخرية والمقتطعات الأخرى من قاع البئر وعن وجه مثقب الحفر.
- حمل الحُفارة إلى خارج البئر، وتزيد القدرة على القيام بهذا العمل مع سرعة السائل الصاعد ومع لزوجته وكثافته، ومن أجل تأمين الفاعلية وفي إزالة الحُفارة يجب ألا تقل السرعة عن مستوى حرج يتراوح عادة بين ٤٠ و٦٠ متراً في الدقيقة (١٢٠ و١٨٠ قدماً / الدقيقة).
- المساعدة على استمرار الحفر بالسرعة القصوى التي تتفق مع السلامة، ولتحقيق هذه الغاية يجب أن يبلغ ثقل سائل الحفر (الكثافة) درجة تكفي لمنع الغاز أو الزيت أو الماء من التدفق بصورة طليقة من التكوينات التي يتم اختراقها، كذلك يجب الإبقاء على الحد الأدنى من لزوجة الطين وما يحتوي من مواد صلبة وعلى الحد الأقصى من خسارة أو فقدان الراشح filtrate loss بالنسبة للتكوينات المحفورة.
- دعم جوانب البئر ووقايتها ذلك أن ضغط عمود سائل الحفر على جوانب البئر من شأنه أن يحول دون تجويفها أو انهيارها، وبالإضافة إلى ذلك يرسب السائل الصاعد غلافاً واقياً (قشرة طينية mud cake) على التكوينات المسامية وينبغي أن تكون هذه القشرة الطينية رقيقة وأن تمنع دخول الماء من سائل الحفر إلى التكوين الصخري.

- إبقاء الحُفارة معلقة عند وقف الضخ كما يحدث عند استبدال مثقب متثلم مثلاً، ومن أجل القيام بهذه الوظيفة بشكل فعال يجب على سائل الحفر أن يتصلب أو أن يصبح على هيئة هلامية عندما يكون معطلاً وأن يعود ويصبح سائلاً عند تشغيله.
- تبريد المثقب، فالمثقب يولد حرارة شديدة عندما يقوم بالحفر تحت حمل ثقيل.
- التمتع بميزات خاصة كأن يكون موصلاً أو مقاوماً للتيار الكهربائي وذلك للمساعدة على الحصول على تسجيلات بئرية مرضية كما سوف يأتي الحديث عنها فيما بعد.

ويمكن عند اختراق طبقات شديدة النفاذية أن يتسرب سائل الحفر إلى هذه الطبقات متسبباً في خسارة جزء من السائل أو كله، ولمكافحة فقد الطين mud loss تضاف إلى سائل الحفر مواد ليفية أو قشارية أو حبيبية مثل ألياف الأسبستوس أو قشر السيلوفين أو قشر الجوز أو القش، فإذا تعذر وقف الفقد بهذه الطريقة يضغط خليط من الأسمنت السائل والبنتونيت والماء أو زيت الديزل في الصخر لسد المسام، أما في حالة الحجر الجيري المكهف فإن الخسائر عادة ما تكون بالغة بسبب فقد الطين ويمكن معالجة الأمر بضخ خليط من الرمل والماء إلى أسفل لسد الفجوات والتكهفات، وكبديل لذلك يمكن في بعض الحالات الاستمرار في الحفر دون أن يعود سائل الحفر إلى السطح مما يتيح للسائل كله أن يختفي في التكوين مشكلاً غطاء عائماً من الطين فوق منطقة الفقد للحيلولة دون تفجر البئر blow out وثورانها، وبصورة عامة فإنه بعد أن يتم الانتهاء من عملية الحفر لابد من التخلص من سائل الحفر وعدم استخدامه من جديد إلا إذا كان خليطاً من البنتونيت والماء العذب حيث يمكن نشره على مساحة الأرض المجاورة بهدف تحسين جودتها الزراعية land farming، أما إذا كان السائل من ماء مالح وقاعدة زيتية فإنه يجري نقله بالشاحنات للتخلص منه في مدافن خاصة، وأما إذا كان الحفر في البحر فيتم نقل سائل الحفر بواسطة المراكب والتخلص منه بعد ذلك في مدافن أرضية.

الفصل الخامس عشر

مشكلات ومخاطر الحفر

المخاطرة عند الحفر:

عند حفر أي بئر لا يوجد ضمان مطلق بأن هذه البئر ستكون منتجة للزيت أو الغاز فقد لا يعثر على أي منهما بكميات تجارية، وتعرف البئر حينئذ بأنها خاوية (جافة) dry ويلزم بالتالي سدها وهجرها، ولكن عندما يثبت احتواء البئر على كميات وفيرة من البترول فإن الأمر يتطلب إكمالها وإعدادها لتكون بئراً منتجة producing، وفي الحالتين كانت هناك مخاطرة في تحقيق الهدف وهنا نتذكر نسبة المخاطرة أو النجاح التي أشرنا إليها في الفصل الأول ونقول إن هذه النسبة يمكن تعريفها بأنها نسبة عدد الآبار الناجحة (المنتجة) إلى العدد الإجمالي للآبار المحفورة في منطقه معينة. وتختلف نسبة المخاطرة أو النجاح risk or success ratio بالطبع من منطقه لأخرى ففي الشرق الأوسط وفنزويلا مثلاً تكون هذه النسبة عالية إذا ما قورنت بمناطق أخرى مثل أستراليا واليابان وهذا راجع إلى طبيعة المنطقة وتوافر الشروط الثلاثة للعثور على البترول (المصدر والخزان والمصيدة)، كذلك فليس هناك ضمان في أن تواصل البئر المكتشفة إنتاجها على النحو المرجو فقد تعتريها مشكلات طارئة تفرض سدها وهجرها plug back and abandon وأصبحت بذلك في عداد الآبار الجافة، كما قد تكون نسبة النجاح من الناحية الإحصائية البحتة ضئيلة لكن بئراً واحدةً قد تغير النتيجة بإنتاج غزير وغير متوقع يعادل ما تدره ثلاث أو أربع آبار أخرى منتجة؛ لذا فإن النجاح في هذه الحالة لا يعني أكثر من أنه قد تم العثور على بعض من الزيت أو الغاز ولو جرى مقياس كمي للنجاح لكانت النسبة حتماً غير ذلك.

ارتباط الحفر بالحرارة والضغط:

ترتبط أعمال الحفر بعاملين رئيسين هما درجة الحرارة والضغط وعلاقة كل منهما بالعمق وقد وجد أن ثمة ازدياداً في هذين العاملين مع العمق المخترق للبئر وأن معدل هذه الزيادة على هيئة علاقة خطية ومتفاوتة.

وبالنسبة لدرجة الحرارة يعرف التدرج الجيوحراري geothermal gradient بأنه معدل تغير درجة الحرارة مع العمق ويبلغ مقداره المتوسط للأرض حوالي (2°F / 100 ft) 3.6°C/100 m ولكنه يختلف من منطقة لأخرى ويتراوح بين درجة واحدة إلى تسع درجات

مئوية لكل مائة متر (0.5 to 5°F/100 ft) وتقاس درجة الحرارة داخل الآبار بواسطة ميزان الحرارة thermometer عند أعماق معينة أو عن طريق سجل الحرارة temperature log حيث يمكن الحصول على قراءات متواصلة لقيم الحرارة على طول امتداد البئر، وتكون معادلة التدرج الحراري وارتباطه بالعمق على النحو التالي : $T_f = T_s + G (D/100)$

حيث إن:

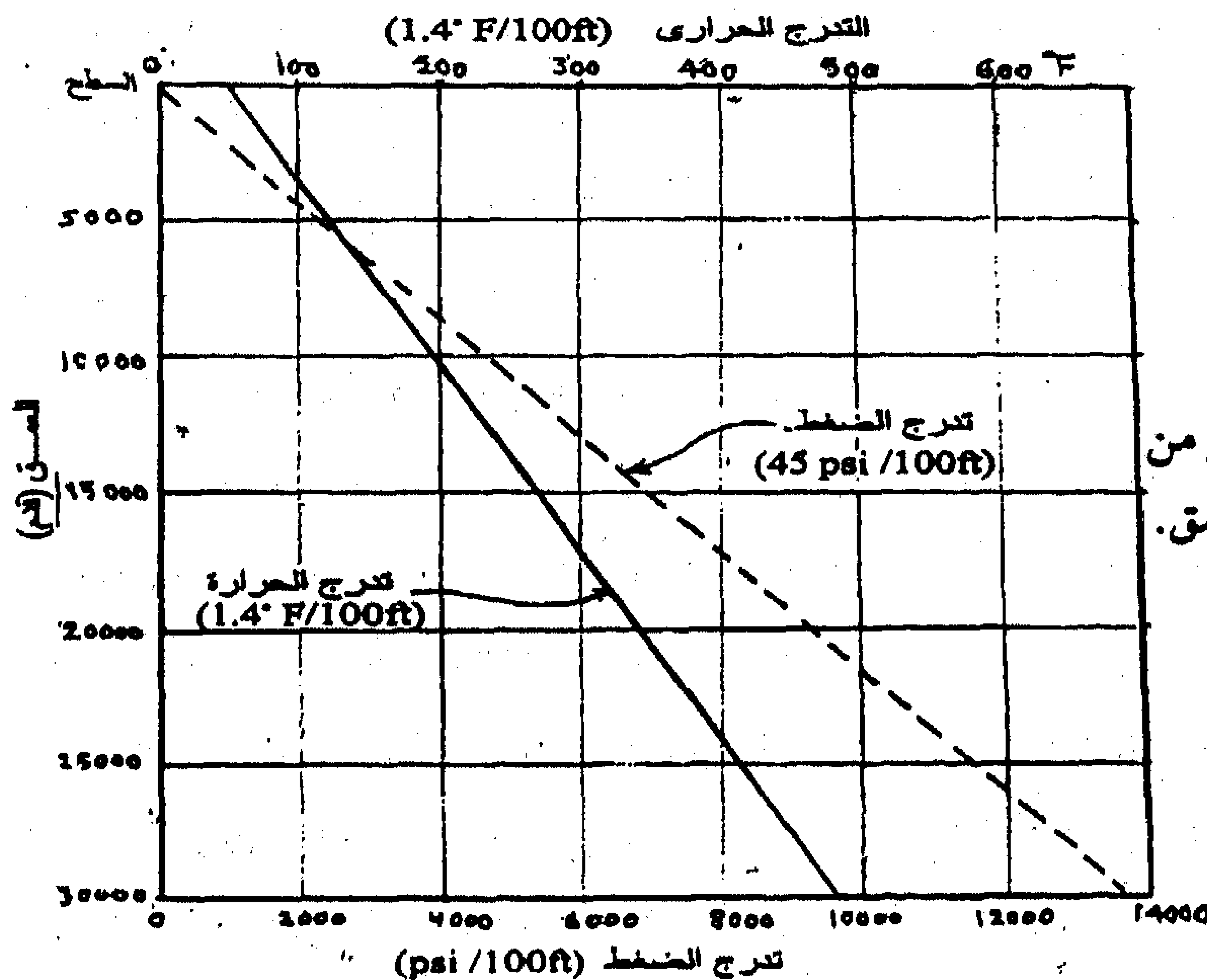
T_f درجة حرارة التكوين (مئوية أو فهرنهيت).

T_s متوسط درجة الحرارة على السطح (مئوية أو فهرنهيت).

G التدرج الحراري مقدراً بـ °C / 100 m أو °F / 100 ft

D عمق التكوين التحتسطي مقدراً بالأمتار أو الأقدام.

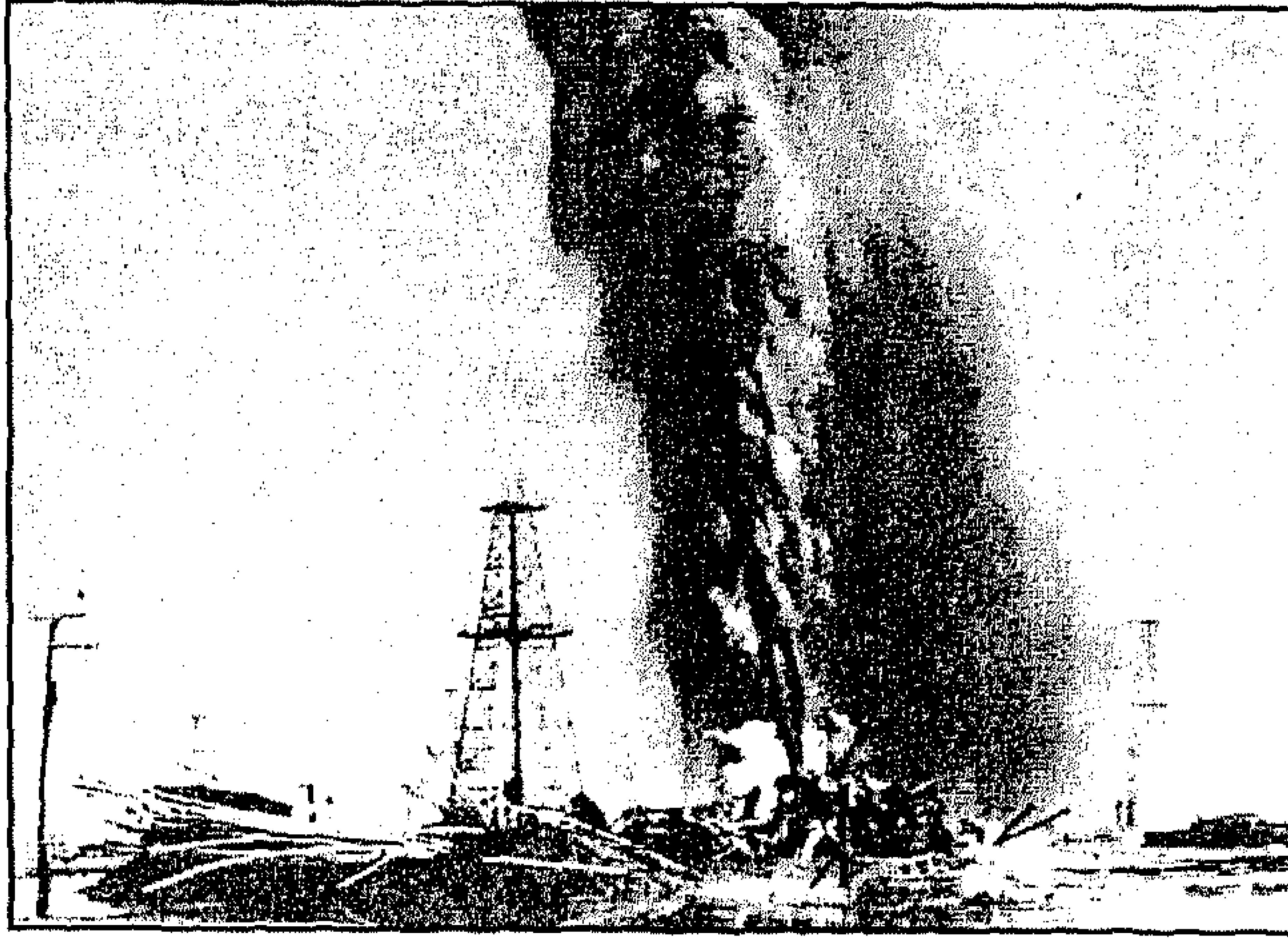
ويمكن من هذه المعادلة حساب درجة الحرارة عند عمق معين إذا ما عرف التدرج الحراري ومتوسط درجة الحرارة على السطح وبسبب ارتفاع درجة حرارة الخزان الجوفي فعندما يصعد البترول إلى سطح البئر يكون ساخناً، ويوضح الشكل ١٥-١ مخططاً للعلاقة بين درجة الحرارة والعمق وحيث يتباين التدرج الحراري من منطقة لأخرى، هذا وتبلغ قيمة التدرج الحراري في المتوسط بالنسبة للحوض الترسيبي نحو ٢٫٥ درجة مئوية لكل ١٠٠ متر أي ١٫٤ درجة فهرنهيت لكل ١٠٠ قدم.



شكل ١٥-١: علاقة كل من الحرارة والضغط مع العمق.

أما بالنسبة للضغط فهناك تحت السطح نوعان من الضغوط وهما الضغط الليثوستاتيكي وضغط الخزان. ويعرف الضغط الواقع على الصخر بالضغط الأرضي أو الضغط الليثوستاتيكي earth or lithostatic pressure وهو يزداد مع العمق وبمعدل متوسط حوالي ٢٣ كيلو جرام على السنتيمتر المربع لكل ١٠٠ متر أي حوالي ١٠٠ رطل على البوصة المربعة لكل مائة قدم. أما الضغط الآخر وهو الضغط الواقع على الموائع الموجودة في مسام الصخر فيعرف بضغط الخزان أو ضغط الموائع reservoir, formation, or fluid pressure، ويتوقف على كثافة عمود الماء الواقع على الخزان ويقدر بحوالي ١٠ كيلو جرام على سم٢/ ١٠٠ متر أي نحو ٤٥ رطلاً على البوصة المربعة لكل مائة قدم، وعلى سبيل المثال فإن الضغط على الزيت داخل الخزان الواقع عند عمق ٣٠٠٠ متر(١٠,٠٠٠ قدم) يكون حوالي ٣١٦ كيلو جرام على سم٢/ ١٠٠ متر أي ٤٥٠٠ رطل على البوصة المربعة لكل مائة قدم (راجع الشكل ١٥-١).

ومن جانب آخر فإن الضغط الهيدروستاتيكي normal or hydrostatic pressure على الموائع بداخل الخزان فإنه ينشأ بسبب وزن عمود الماء داخل المسام الصخرية، وأثناء الحفر فإن ضغط سائل الحفر عادة ما يكون أعلى (اتزان زائد overbalance) من الضغط الهيدروستاتيكي حتى يمكن الاحتفاظ بالموائع داخل الخزان والحيلولة من تدفقها إلى داخل البئر آنذاك. أما إذا كان ضغط الموائع داخل الخزان أعلى من ضغط سائل الحفر (اتزان ناقص underbalance) فإن موائع الخزان من ماء وزيت أو غاز سوف تنساب من مسام الحفر إلى داخل البئر مما قد يتسبب في تكهف جدار البئر وربما أدى ذلك إلى احتجاز المعدات داخل البئر، بل ربما تجاوز الأمر إلى إحداث ثوران وتفجر البئر وخروجها عن السيطرة واندلاع النار بها كما في الشكل ١٥-٢ الذي يمثل بئراً متفجرة قرب لونج بيتش في كاليفورنيا.



شكل ١٥-٢: بئر متفجرة قرب لونج بيتش في كاليفورنيا.

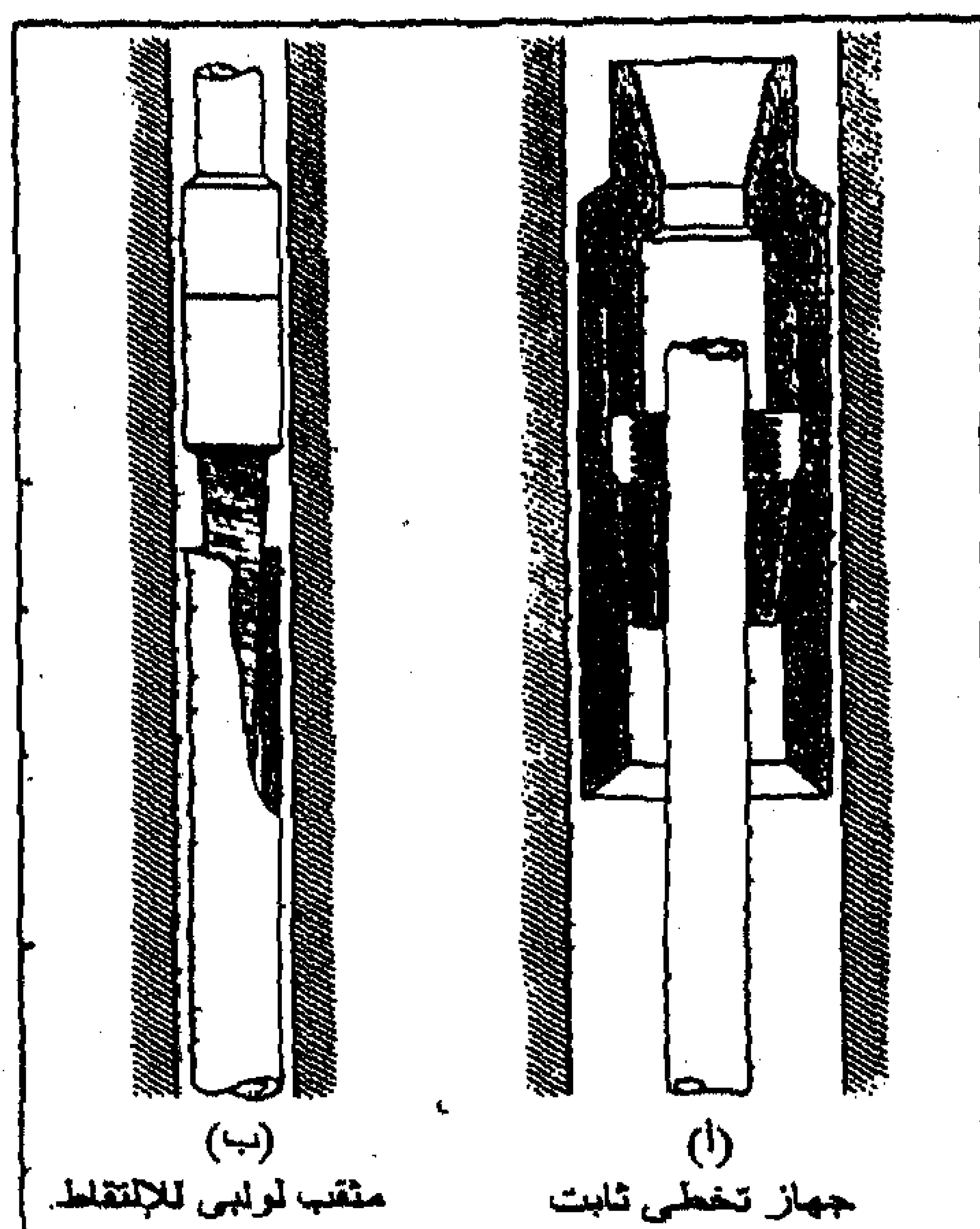
أنواع المشكلات والمخاطر أثناء الحفر

ليس حفر بئر بالأمر السهل دائماً إذ قد تصادفه واحدة أو أكثر من المشكلات والمخاطر التي تتطلب حلولا سريعة وفعالة ذلك أن هذه المشكلات ينشأ عنها تعليق الحفر لفترة لحين التغلب عليها وإعادة البئر إلى مسارها الطبيعي، وفيما يلي عرض موجز لعدد من المشكلات والمخاطر الأكثر تعرضاً لها أثناء أعمال الحفر وكيفية معالجتها.

- **الالتقاط:**

من المخاطر الشائعة التي تصادف عملية الحفر أن ينكسر جزء من مُعدَّة ويسقط في قاع البئر، كما قد يحدث أيضاً أن تلتوي سلسلة أنابيب الحفر أو أن ينفصل أحد مخاريط المثقب أو أن تسقط آلة مثل مفتاح ربط الأنابيب من على أرضية برج الحفر إلى داخل البئر مما يحول دون استمرار الحفر وتعليقه لحين استدعاء خبير متخصص لالتقاط fishing هذه القطع السائبة وسحبها إلى خارج البئر وذلك باستخدام أدوات مصنعة لهذا الغرض، وتطلق كلمة لقطة (سقطة) fish or junk على كل جزء من سلسلة أنابيب الحفر وعلى مخروطات المثاقب أو غيرها من السقط الذي يبقى في البئر بسبب عطل ميكانيكي أو عند حل التوصيلة وفك الأنابيب، وتبذل أحيانا محاولات لاستخراج هذه اللقطات أو يتم تجاوزها، ويمكن التقاط الأجزاء الصغيرة بمغناطيس أو ملقط سقط في حين أن اللقطات الكبيرة بما فيها الأنابيب تحتاج إلى جهاز يتخطى اللقطة أو إلى مثقب لولبي ويستخدم

جهاز التخطي ليقبض على الأنبوب من الخارج في حين أن المثقب اللولبي يُحتوى داخل الأنابيب السميكة كأطواق الحفر ويقبض عليها بواسطة سطحه المستدق (شكل ١٥-٣).



شكل ١٥-٣: أدوات التقاط نموذجية.

إن الوقت الذي يصرف حاليا في محاولة استعادة لقطة ما هو أقل مما كان ينفق في الماضي وخاصة في الآبار العميقة إذ إن حل التوصيلة وفك الأنابيب ثم الانحراف عن اللقطة أوفر بكثير في أغلب الأحيان من إنفاق الوقت على عمليات التقاط مضنية وغير ناجحة في كثير من الحالات.

• **أنبوب الحفر العالق:**

يحدث أحياناً أن سلسلة أنابيب الحفر تعلق في البئر نتيجة عائق ميكانيكي كانكسار مخروط المثقب أو زيادة كبيرة في الحُفارة أو مصادفة تكوين متكهف أو بسبب الاحتكاك الناجم بصورة رئيسة عن التأثيرات المائية والراجع إلى زيادة ضغط السائل في البئر حيث غرز الأنبوب في القشرة الطينية أو نتيجة لمجموعة من هذه الأسباب.

ويمكن أحياناً رفع الأنبوب العالق stuck pipe عن طريق تزييت lubricating المنطقة المواجهة للجزء العالق من الأنبوب ويتم التزييت بواسطة مزلق lubricant يعرف بسائل التبقيع spotting fluid وهو عبارة عن مزيج من الديزل أو الزيت المعدني وبعض

المواد الأخرى ذات الفاعلية السطحية حيث يتاح إغراق المنطقة المعنية بهذا السائل أثناء سحب الأنابيب وزحزحتها فإذا استحال رفع سلسلة أنابيب الحفر بهذه الطريقة استعين بالآلات لتحديد النقطة العالقة مثل مبين خاص stuck-point indicator tool ثم تنزل شحنة صغيرة من المتفجرات فوق هذه النقطة مباشرة داخل سلسلة أنابيب الحفر ويؤدي تفجير هذه الشحنة إلى حل توصيلة الأدوات انحلالاً كافياً يتيح فكها بسهولة بواسطة التدوير الرحوي من على السطح ويجب عندئذ الانحراف لتجاوز الجزء العالق وذلك باستخدام موجه الحفر على النحو المطلوب.

لم تعد الأنابيب الآن تلتصق داخل الآبار بالكثرة التي كانت تحدث في الماضي وذلك بسبب تحسين طرق استخدام الطين واستخدام أجهزة تركيز في سلسلة أدوات الحفر تساعد على منعها من الغروز داخل القشرة الطينية، كذلك فإن استخدام أطواق حفر خاصة ذات مقطع عرضي غير دائري يساعد على منع الأنابيب من أن تعلق بسبب الفارق في الضغط.

● **الطفل المنسلخ:**

الطفل المنسلخ sloughing shale هو نوع من الطفل الرخو بداخل البئر ويتمتع بقدرته على امتصاص الماء من طين الحفر مما يؤدي إلى تمدده في الحجم وسقوطه إلى قعر البئر على هيئة كرات ليس من السهل إزالتها بواسطة سائل الحفر، وللتغلب على هذه المشكلة تضاف إلى سائل الحفر بعض المواد الكيميائية مثل أملاح البوتاسيوم أو أن يستخدم طين حفر ذو قاعدة زيتية وهذا من شأنه أن يمنع تكوُّن الطفل المنسلخ.

● **فقد الطين:**

في بعض الأحيان قد تصادف البئر أثناء حفرها تكويناً ذا مسامية عالية للغاية أو صخراً مشققاً أو متكهفاً كالحجر الجيري مما يتسبب في ترسب كميات هائلة من طين الحفر وفقدها داخل هذه التكوينات فتقل بذلك فعالية الطين ويقل الضخ أو ينقطع ويصبح الحفر عندئذ مستحيلا، ويسمى النطاق المسئول عن ذلك الترسب النطاق الآسر thief or lost circulation، ولمعالجة هذا الأمر تضاف إلى طين الحفر مواد تعمل على سد المسام أو الشقوق في النطاق الآسر مثل الألياف والرقائق ومصاصة القصب ونشارة

الخشب والتبن والبلاستك والسيلوفان والشعر والأسبستوس والصوف والجلد وغيرها وإذا لم يؤد هذا إلى النتيجة المتوخاة يستعان بالأسمنت أو بوسائل أخرى وقد يكون من الضروري في الحالات القصوى تركيب سلسلة إضافية من أنابيب التغليف (التبطين) قبل استئناف الحفر وذلك بهدف حماية البئر من الانهيار والحفاظ على سلامتها.

- **ضرر التكوين:**

أحياناً ما يلحق بالتكوين التحتسطحي ضرر formation damage قد يكون بالغاً ومؤثراً على خصائصه الخزانية من حيث المسامية والنفاذية، فعندما يجري الحفر بطريقة الاتزان الزائد overbalance فإن جانباً من سائل الحفر ومعه بعض مكوناته الدقيقة يتخلل المسام الصخرية على هيئة راشح filtrate يعمل على إنقاص هذه المسام وربما تسبب في تدمير نفاذية الصخر بشكل كبير، ويسمي هذا الأمر الضرر السطحي للتكوين formation or skin damage ولمعالجة هذا الضرر يجري للبئر تنشيط لها well stimulation إما عن طريق الغسل بالحامض acidising أو التكسير الهيدروليكي hydraulic fracturing وكلتا الطريقتين تعملان على استعادة النفاذية للتكوين المتضرر، هذا ويمكن تجنب حدوث هذا الضرر باستخدام الماء الشديد الملوحة brine أثناء الحفر أو استخدام الطين ذي القاعدة الزيتية أو أي نوع آخر من سوائل الحفر الاصطناعية، أو أن يجري الحفر باستخدام محلول منخفض الكثافة من شأنه أن يحدث قليلاً من الضغط على الخزان الجوفي وهو ما يعرف بالاتزان الناقص underbalance ولكنه قد لايمنع من تدفق الموائع من داخل الخزان إلى البئر كما سبق أن ذكرنا، وللتحكم في الضغط هناك على طاولة الحفر الرحوية مُعدَّة تسمي رأس التحكم الدوارة rotating control head تحتوى على مكونات مانعة للتسرب، وبالطبع فإن الحفر بالاتزان الناقص لا يجري على طول امتداد البئر ولكنه قد يلزم عند الحاجة إليه داخل قطاع محدود من البئر وفي هذه الحالة لا بد من إخماد أو قتل killing البئر بواسطة ملئها بسائل حفر ثقيل قبل الشروع في سحب مواسير الحفر منها إلى الخارج.

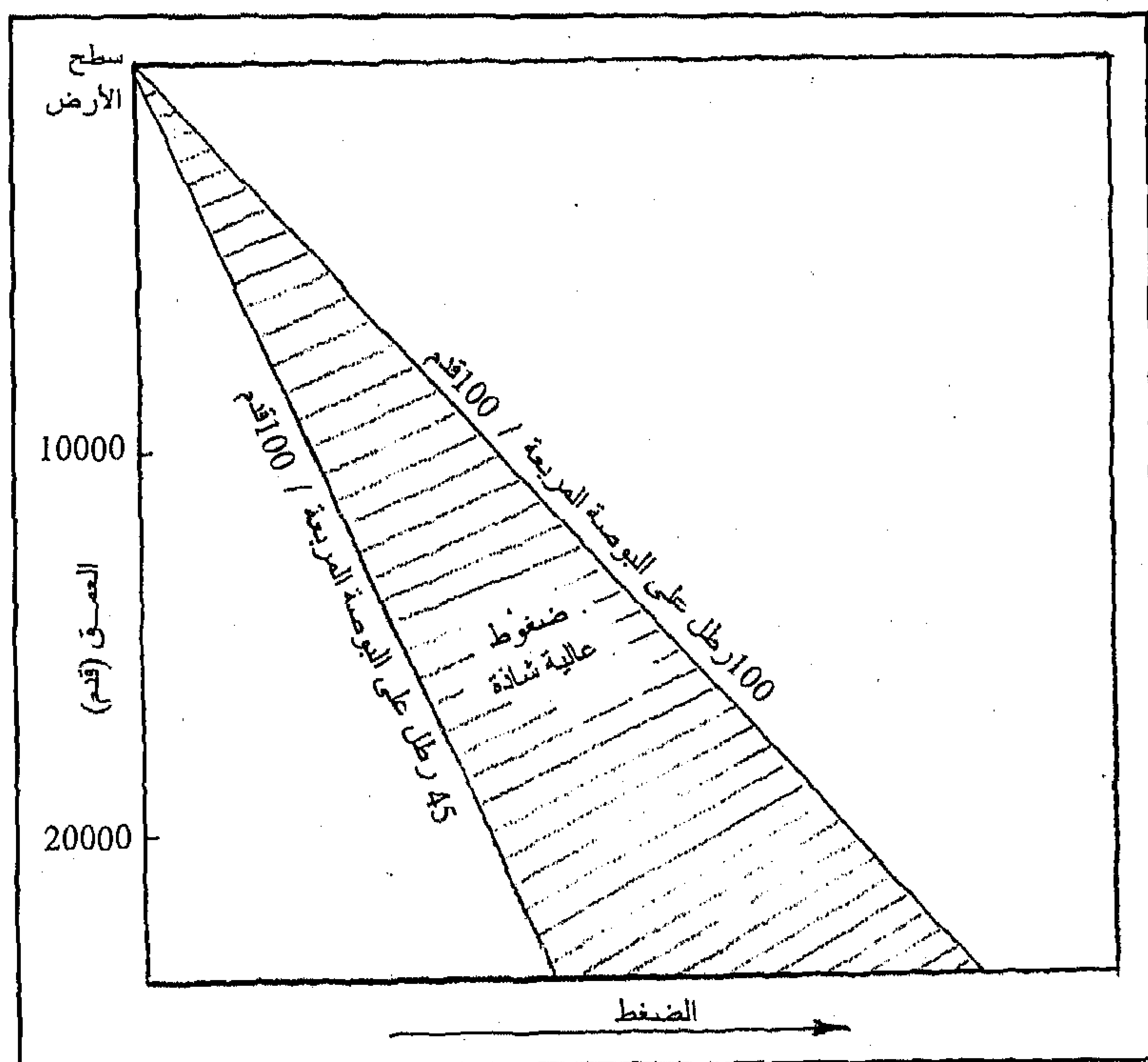
- **الغازات الأكّالة:**

هناك بعض المناطق التي تتميز بوجود الغازات التي تسبب في تآكل المواد corrosion ونحتها مثل ثاني أكسيد الكربون (CO_2)وكبريتيد الهيدروجين(H_2S) والتي تنطلق من

قلب التكوينات الجوفية إلى داخل البئر التي يجري حفرها ومن شأن هذه الغازات أن تضعف من متانة سلسلة أنابيب الحفر وتعمل على تقصفها embrittlement، ولتجنب هذه المخاطر ينبغي أن تكون مواسير الحفر مصنوعة من الصلب ذي الجودة الفائقة والمقاوم للتآكل.

- **الضغوط العالية الشاذة (التفجر)**

قد تسبب الضغوط العالية الشاذة abnormal high pressures شكل ١٥-٤ الناشئة وغير المتوقعة داخل الآبار أثناء حفرها ما يعرف بالتفجر أو الثوران blowout، والتفجر هو أعظم المخاطر وأشدها نكبة على الإطلاق بسبب ما ينطوي عليه من خطر اندلاع الحريق والتأثيرات السلبية على البيئة وقد تكون تكلفة استعادة السيطرة على البئر عندئذ باهظة جداً بالإضافة إلى ما سوف يهدر من كميات كبيرة من الزيت والغاز. ولئن أصبحت حوادث التفجر نادرة الوقوع فإن احتمال حدوثها لا يزال قائماً لاسيما عند مصادفة زيت أو غاز تحت ضغوط تكون أعلى من الضغوط المتوقعة عادة.



شكل ١٥-٤: تدرج الضغوط الشاذة في الآبار.

ويكـون تـدفق الموائـع مـن التكوينـات الخزانيـة إلى البئـر عـلى هيئـة ركـلات أو رفسات kicks، وعند تدفق الماء أو الغاز أو الزيت إلى داخل البئر فإنه يختلط بسائل الحفر ويتسبب في تخفيـف كثافتـه وبالتـالي إحـداث ضـغط أقـل عنـد قـاع البئـر ويـسمى الـسائل المخفف قطعية الغاز والماء والزيت gas cut، water cut، oil cut وغالباً ما يكون الدليل الأول على حدوث تلك الركلات هو ذلك الارتفاع الملحوظ في حجم السائل المتدفق من البئر مقارنة بحجم الطين المضخ وهو ما يمكن التأكد منه من خلال مراقبة مستوى سائل الحفر داخل خزان أو حفرة الطين والذي يتم بواسطة جهاز خاص يعطي إنذاراً عند فقد الطين داخل البئر أو زيادة حجمه تبعاً للركلات الحادثة كما أن طين الحفر يجري مراقبته لاحتمال حدوث تغيرات في وزنه ودرجة حرارته ومقاومته الكهربائية، ومن الأدلـة أيـضاً على وجود الضغوط العالية غير العادية والشاذة هو وجود طبقات الطفل ذات كثافة أقل ومسامية أعلى من المقدر لها تحت الظروف العادية والتي تفترض أن تـزداد كثافتهـا وتقـل مساميتها مع ازدياد العمق وهو أيضاً مـا يلاحـظ بالتزايـد في معـدل الاخـتراق في طبقـات الطفل الناقصة الانضغاط.

وإذا أظهـرت الـدلائل أن سـائل التكـوين يـدخل البئـر أو قـد دخلهـا وجـب إقفـال المعدات المانعة للتفجر وإجراء فحص لمعرفـة الـضغوط المتجمعـة عـلى الـسطح في البئـر المغلقة وقراءة الضغط في هذه الحالة ترشد إلى الكمية اللازمة من الطين الأثقل kill mud وذلك لاستمرار التحكم في الضغط، ويجب ضخ هذا الطين الجديد فوراً والمحافظة في آن واحد على ضغط خلفي في خط العودة إلى أن يتم تنظيف البئر ويصبح بالإمكان استئناف الحفر بصورة عادية، ويجب تيسير الطين الثقيل بصورة مستمرة لمثل هذه الحالة إذ بدونه لا يمكن إبقاء البئر تحت سيطرة متواصلة، ويضاف الباريت أو مادة ثقيلـة مـشابهة إلى سـائل الحفر لإعطائه هذه الكثافة الإضافية.

وعادة ما تنشأ الضغوط العالية في الخزانات المعزولة والمحدودة الامتداد كالعدسـات وتلك المقطوعة بالصدوع المانعة، أما في الخزانـات التـي تمتـد إلى مـساحات كبـيرة فعنـدما تـدفن الرواسـب تحـت الـسطح فإنهـا تـستجيب للـضغوط الواقعـة عليهـا حيـث تنـضغط وتتماسك وتتناقص مساميتها وتفقد بعضاً من الموائع التي تحتويها الأمـر الـذي يتـسبب في نشأة ضغوط هيدروستاتيكية عادية، أما في حالة الخزانات المعزولة فإنه لا يعتريها انضغاط

كبير كما يبقى ما بها من موائع على حاله وبالتالي فإن الضغط الواقع على الصخور ينتقل إلى ضغط على الموائع ومن ثم توليد الضغوط العالية غير المعتادة والتي قد تصل في مقدارها إلى ضعف الضغوط الهيدروستاتيكية العادية (راجع الشكل ١٥-٤ والذي يوضح أيضاً مقارنة بين هذين النوعين من الضغوط عند الأعماق المختلفة).

وتجدر الإشارة إلى أن حوالي ٥٠٪ من حالات التفجر تحدث أثناء رحلة سحب سلسلة أنابيب الحفر من البئر إلى خارجها حيث تسحب هذه العملية حجماً من سائل الحفر، ومع استمرار رفع المواسير يتناقص بالتالي مستوى الطين داخل البئر مما يؤدي إلى تدني الضغط عند قعر البئر وإذا لم يتم المحافظة على مستوى سائل الحفر بالبئر فإن حالة الاتزان الزائدة تفقد وتتسبب في حدوث تلك الركلات ولهذا السبب يوجد بالموقع خزان من الصلب trip tank تبلغ سعته ما بين ١٠ – ٤٠ برميل- حجم لحفظ سائل الحفر الذي سيستخدم في المحافظة على مستوى طين الحفر داخل البئر أثناء رحلة السحب إلى الخارج، كذلك فإذا ما تم سحب مواسير الحفر بشدة وبسرعة من البئر قد ينتج عن ذلك انطلاق الغاز من التكوين الجوفي مسبباً ركلة تنم عن هذا الحدث.

ولدوافع الأمان والطمأنينة تجرى على موقع الحفر اختبارات دورية على مانعات التفجر وللتأكد من كفاءة معدات التشغيل وكذا التحقق من مدى استجابة طاقم العمل والتعامل مع هذه الحالات الطارئة.

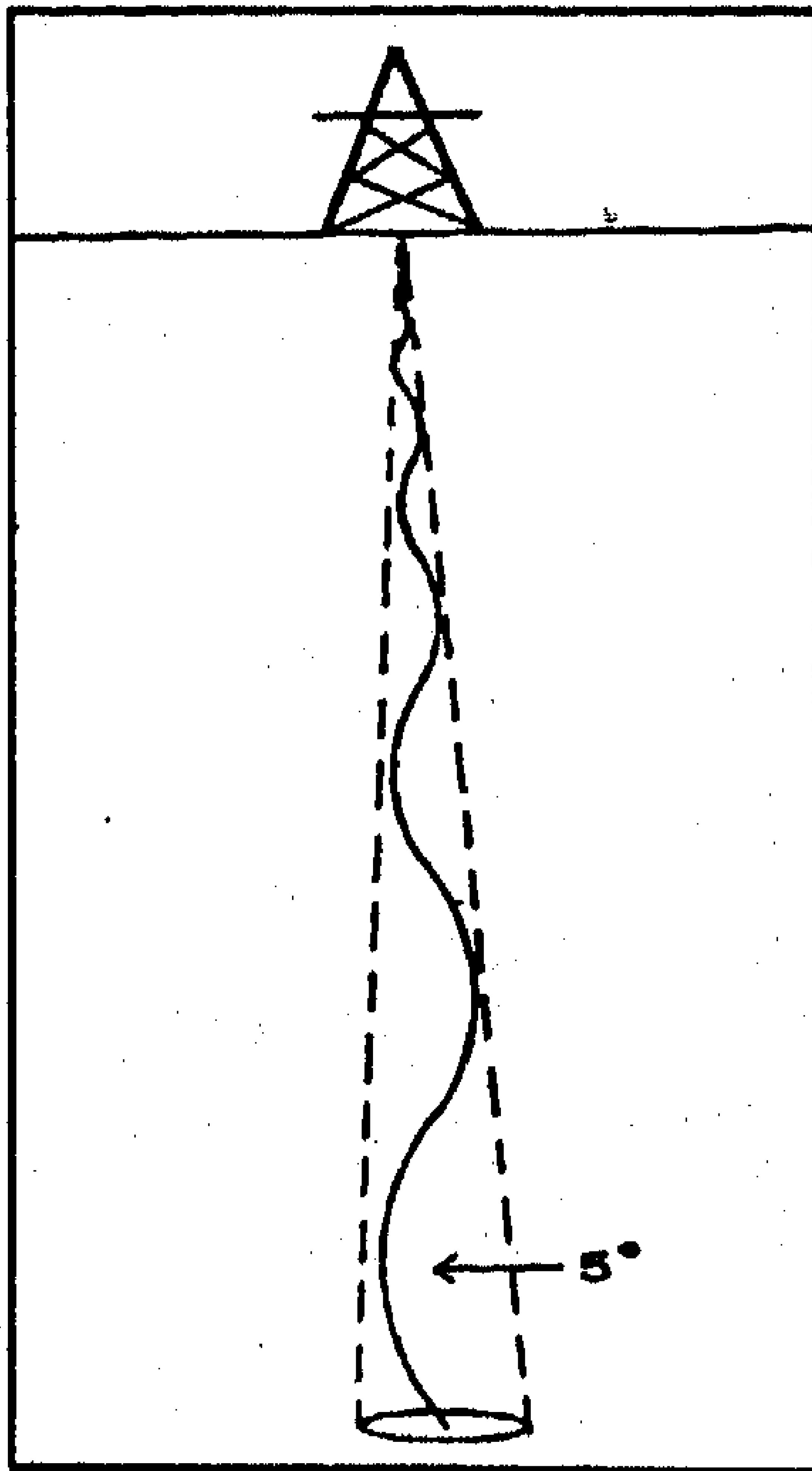
الفصل السادس عشر
أساليب حفر الآبار

تتعدد أساليب حفر الآبار drilling techniques سواء كانت هذه الآبار استكشافية أو إنمائية أو كان الحفر على الأرض أو في المياه، والهدف من كل هذه الأساليب التقنية هو تحقيق النجاح والعثور على البترول وإنتاجه بشكل آمن والحصول على عائد مالي مناسب.

ولقد تعرضنا في فصل سابق لنظم الحفر المختلفة والتي شملت الحفر الدقاق والرحوي والتوربيني أما الآن فنحن بصدد مناقشة الأساليب والتقنيات الحديثة التي يجري تطبيقها على أرض الواقع حيث هناك الحفر العمودي والحفر المائل والحفر الأفقي ولكل أسبابه وأهدافه.

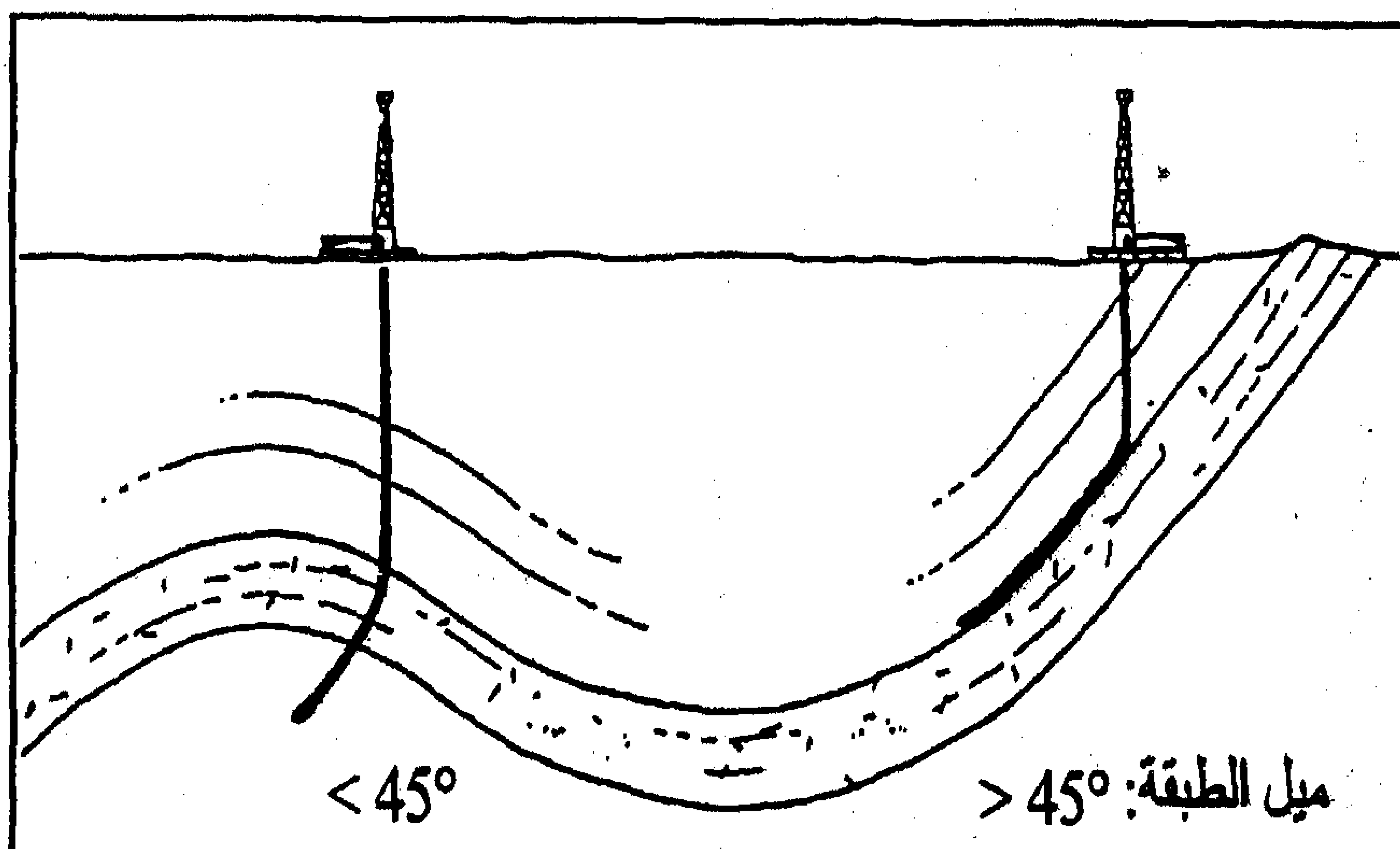
الحفر العمودي:

تحفر الآبار عادة بطريقة عمودية خاصة الضحلة منها، وحسب التعريف السائد تعتبر البئر المحفورة عمودية (مستقيمة) straight hole إذا لم يتجاوز معدل انحرافها ثلاث درجات لكل ٣٠ متراً (١٠٠ قدم) وأن مسارها يدخل ضمن مخروط زاويته القصوى خمس درجات (شكل ١٦-١).



شكل ١٦-١: مسار لبئر مستقيمة.

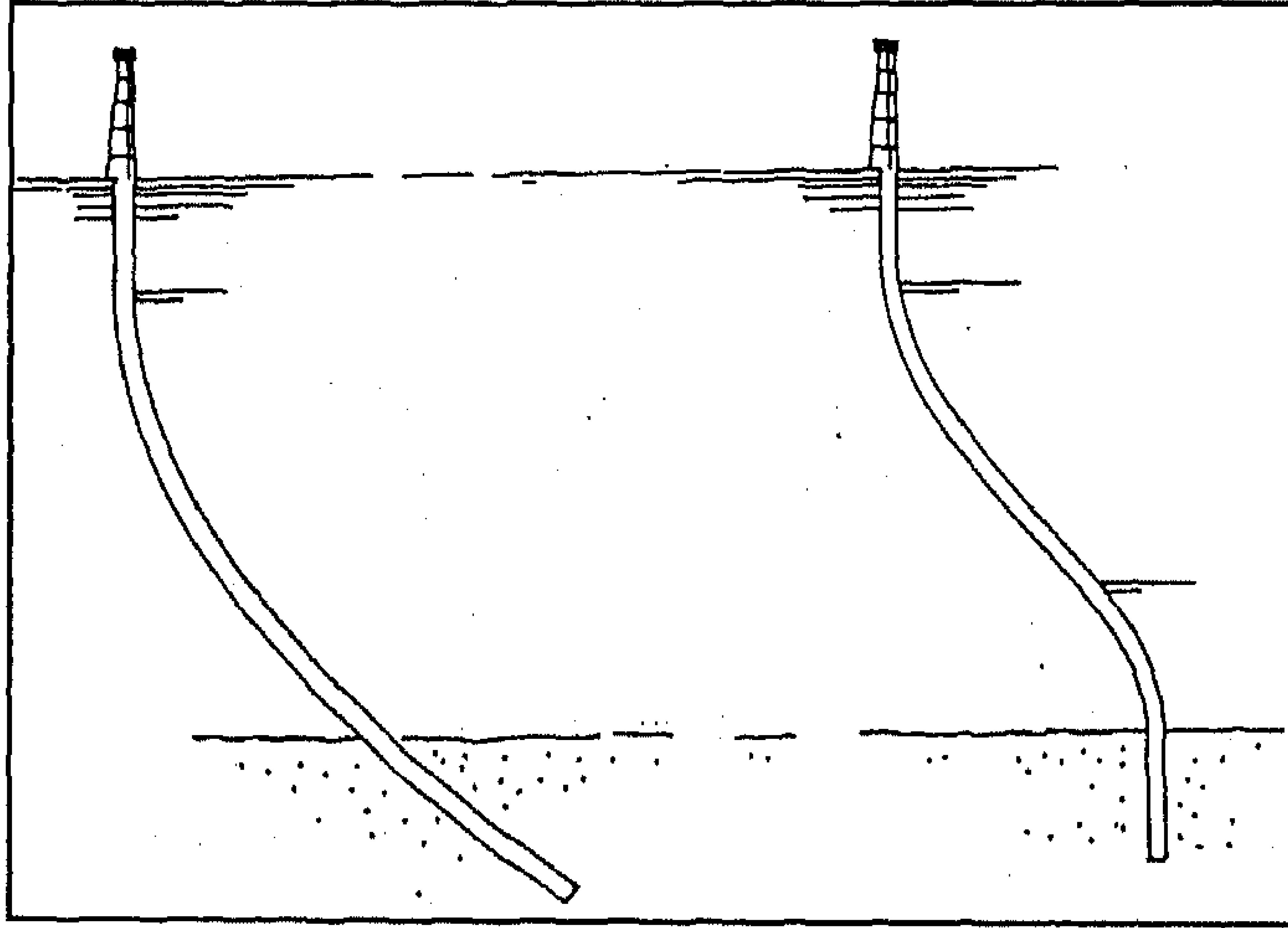
وعندما دخل الحفر الرحوي إلى التطبيق لم يستطع الحفارون في بادئ الأمر التحكم في حفر الآبار العمودية بسبب مصادفة هذه الآبار أحياناً لطبقات من صخور صلبة ومائلة، وإذا ما أصاب مثقب الحفر طبقة مائلة بأكثر من ٤٥ درجة فإن المثقب يميل للإنحراف تجاه أسفل الميل، وإذا كان ميل الطبقة أقل من ٤٥ درجة فإن المثقب ينحرف أعلى الميل، ولما كانت حركة المثقب في اتجاه عقارب الساعة (أي إلى اليمين) فإن البئر نفسها تميل إلى التحرك إلى اليمين أيضاً كلما تقدم الحفر وازدادت البئر عمقاً، وبسبب وجود الطبقات المائلة وتعاظم زاوية انحراف عن غير قصد فإن هذه البئر يطلق عليها بئراً منعطفة أو غير مستقيمة crooked hole (شكل ١٦-٢)، وقد كانت الجهود ناجحة إلى حد كبير عندما كانت أحمال مثقب الحفر منخفضة، غير أن استخدام الأحمال الثقيلة على الرغم من التحسينات التي أدخلت على سرعة الحفر كان يؤدي أحياناً إلى زيادة زاوية البئر لاسيما في الطبقات الشديدة الميل. والطريقة العصرية المتقدمة هي السماح بالانحراف الطبيعي إلى مدى عشر درجات أو أكثر بشرط عدم تكوين زوايا انحراف مفاجئة، وإذا كان ميل الانحراف الطبيعي واضحاً أمكن جعل الموقع السطحي في مكان يتيح إكمال البئر عند النقطة المتوخاة.



شكل ١٦-٢: انحراف البئر بسبب ميل الطبقات.

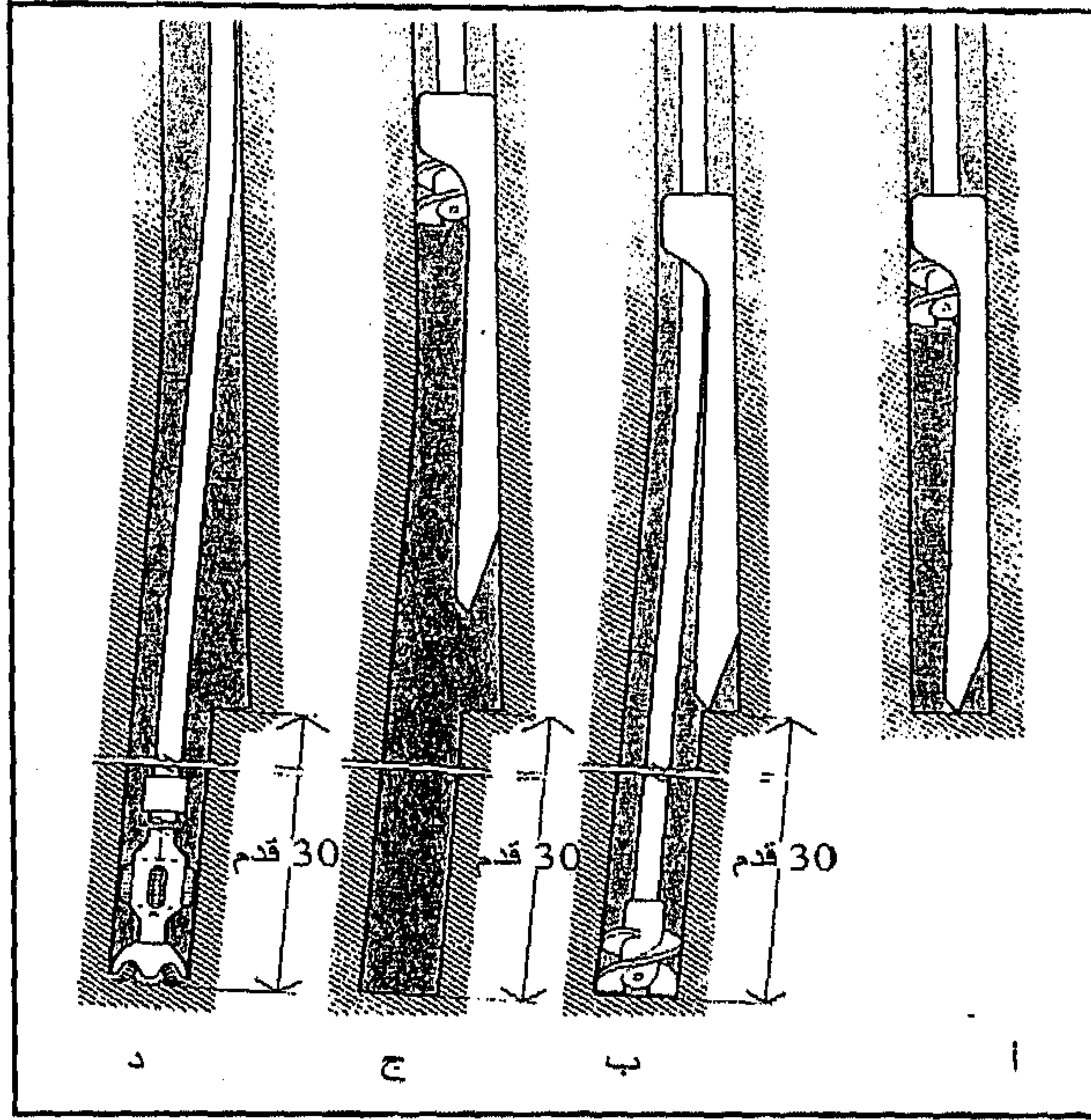
الحفر الاتجاهي:

عادة ما يتم حفر الآبار بطريقة عمودية لما يشكله هذا الأسلوب من أمان عال وتكلفة أقل، غير أن الأمر قد يتطلب أحياناً حفر بئر مائلة deviated well (شكل ١٦-٣) إذا كانت الطبقات الحاملة للبترول مثلاً تحت منطقة مغمورة بالمياه وعندما يكون من الضروري أيضاً حفر عدد من الآبار من موقع واحد كما هو حادث على منصات الحفر البحري حيث قد تحفر ١٢ بئراً أو أكثر من منصة مركزية واحدة. والواقع أن تكلفة حفر بئر مائلة يفوق تكلفة حفر بئر عمودية على أعماق متساوية ويرجع السبب في ذلك إلى التقدم البطيء في الحفر وإلى الوقت اللازم لدراسة اتجاه وانحراف البئر ولتصحيح ذلك عند الضرورة، وهو ما قد يستغرق وقتاً إضافياً يقدر بنحو ٣٠٪.



شكل ١٦-٣: نموذجان لبئرين مائلتين لهدف واحد.

والأسلوب المتبع في الحفر الاتجاهي directional drilling هو البدء بحفر البئر عمودياً لمسافة قصيرة ثم تبطينها قبل الشروع في الحفر المائل، ثم يدق إسفين من الصلب whipstock أو موجه حفر متنقل لبدء الحفر في الاتجاه المطلوب. ويدفع موجه الحفر مثقباً خاصاً في داخله بعيداً عن الخط العمودي، وفي حين يحفر المثقب نزولاً وصعوداً يبقى مُوجه الحفر ثابتاً وينزلق الأنبوب إلى أسفل داخل الجلبة العليا في هيكل موجه الحفر كما هو مبين بالشكل ١٦-٤.

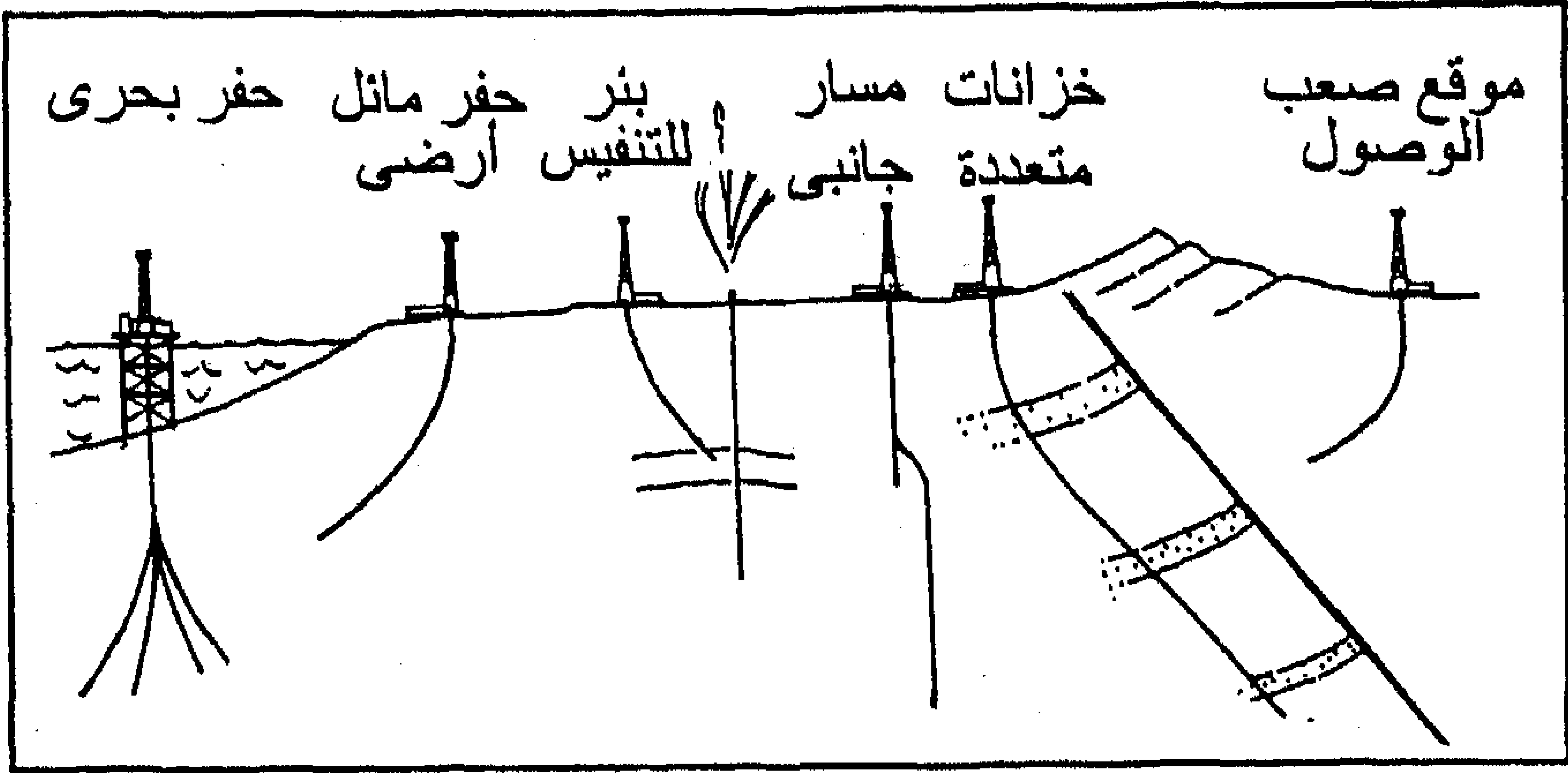


شكل ١٦-٤: الحفر المائل (أ) موجه الحفر في موضعه،
(ب) حفر ثقب مائل على مسافة قصيرة، (ج) سحب موجه الحفر،
(د) توسيع الثقب المائل ومتابعة عمليات الحفر.

وتستخدم عادة أدوات خاصة تعمل باستخدام البوصلة المغناطيسية magnetic compass أو الجيروسكوب gyroscope لهداية موجه الحفر إلى الاتجاه المطلوب، وتستخدم هذه الأدوات أيضاً من وقت لآخر لمراقبة اتجاه سير الحفر، كما تستخدم مجموعات صلبة أو لينة مختلفة فوق المثقب في أثناء الحفر للمحافظة على اتجاه البئر أو لإتاحة بناء زاوية وتصحيح أي انحراف، ويستمر بناء الزاوية إلى أن تبلغ الحد الأقصى المطلوب الذي قد يتراوح ما بين ٣٠ أو ٤٠ درجة أو أكثر حسب قدر الإزاحة الجانبية الذي يتطلبه قاع البئر، أما معدل بناء الزاوية فهو درجتان أو ثلاثة كل ثلاثين متراً، وبعد أن يتم الحصول على الزاوية المطلوبة يحافظ عادة على بقائها ثابتة إلى أن يتم إنجاز البئر. ومن شأن ذلك أن يتيح استخدام مجموعة من الأدوات الصلبة مما يؤدي إلى الإسراع في الحفر.

ولقد شاع استخدام الحفر المائل خلال السنوات الأخيرة خاصة بعد اكتشاف العديد من حقول البترول والغاز الطبيعي في المناطق المغمورة بالمياه واستخدام المنصات البحرية

والتي تحتوي كل واحدة على عدد من الثقوب slots يمكن من خلالها حفر عدد وافر من الآبار المائلة للمنصة الواحدة شكل ١٦-٥.



شكل ١٦-٥: آبار مائلة لأهداف متعددة في البحر وعلى اليابسة.

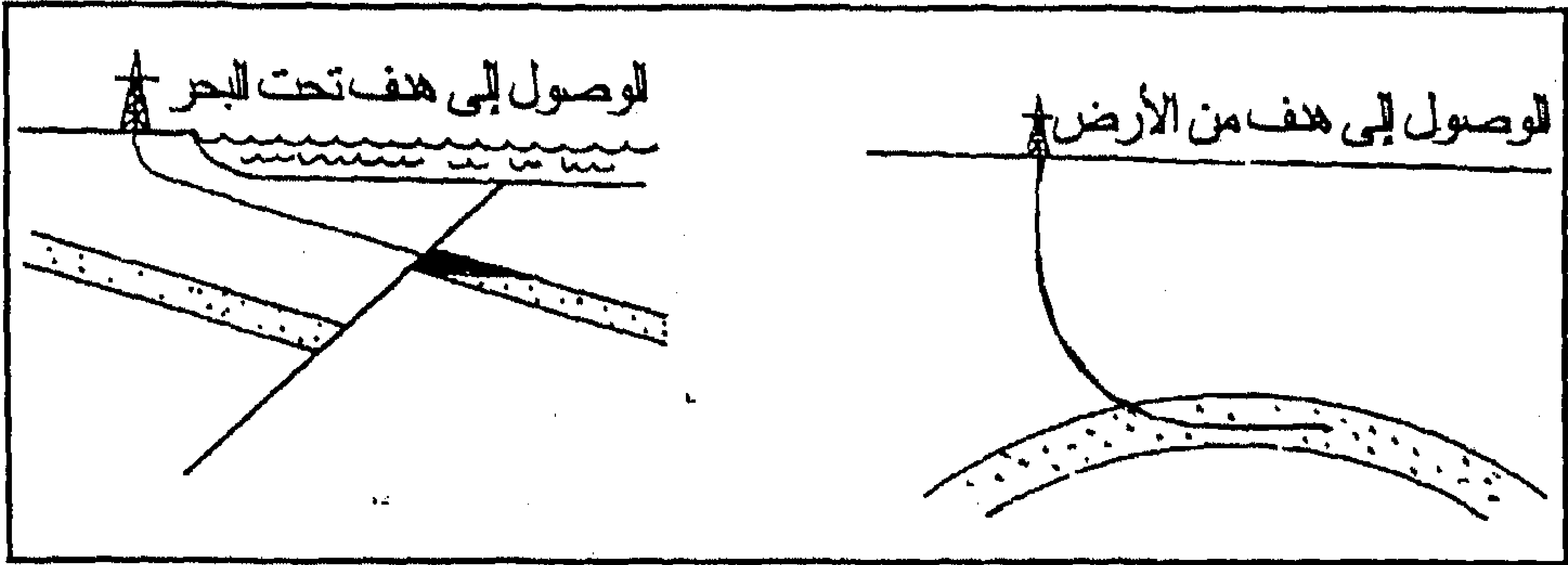
كذلك فقد كان الفضل للحفر المائل في السيطرة والتحكم في الآبار جامحة التدفق والثوران wild wells وذلك عن طريق حفر بئر مائلة للتخفيف أو التنفيس relief well من نقطة قريبة (نصف كيلو متر أو أقل) من البئر المتفجرة، حيث تتصل بئر التخفيف بالبئر المذكورة عند مستوى الطبقة المنتجة تقريباً وتضخ كميات كبيرة من طين الحفر الثقيل kill mud من خلال هذه البئر لإخماد التدفق في البئر الرئيسة (شكل ١٦-٥) وبالطبع فإن هذا ليس أمراً سهلاً بل يتطلب جهوداً مضنية وحرفية عالية، وهناك الأمثلة الحقلية التي تشهد على ذلك في عدة بلدان كما حدث في لونج بيتش بكاليفورنيا وخليج المكسيك وبحر الشمال والكويت وغيرها.

كما أن الحفر المائل قد يكون وسيلة جيدة للغاية في حالة إذا ما تعرضت البئر الأصلية إلى كسر أو التصاق أحد أجزاء أنبوب الحفر وفشلت الجهود في تحريره أو إزالته من داخل البئر فإنه يمكن استئناف الحفر والوصول إلى الهدف السابق بالبدء في حفر مسار جانبي side trackعند نقطة معينة kickoff point داخل البئر الأولى وفتح نافذة بداخلها دون الحاجة إلى حفر بئر جديدة مما يوفر الكثير من النفقات (شكل ١٦-٥).

هذا ويمكن أيضا من خلال البئر المائلة اختبار عدة طبقات للتعرف على إمكانياتها البترولية بدلاً من حفر آبار رأسية منفصلة لاختبار كل طبقة على حدة (شكل ١٦-٥).

الحفر الأفقي:

هو نوع من الحفر المائل والذي تتعاظم فيه زاوية ميل المثقب ليصبح تحركه داخل الطبقة المستهدفة أفقياً تقريباً، وتتكون البئر في الحفر الأفقي من مقطعين: المقطع العلوي ويعرف بالمقطع الهندسي geometric section والذي يختص بالجزء العلوي من البئر ويتم الحفر خلاله بصورة عمودية حسب البرنامج المخطط له، أما المقطع السفلي فيعرف بالمقطع الموجه geosteering section والذي تتعاظم خلاله زاوية ميل المثقب حتى يصبح هذا الأخير في حركة أفقية تقريباً (شكل ١٦-٦).

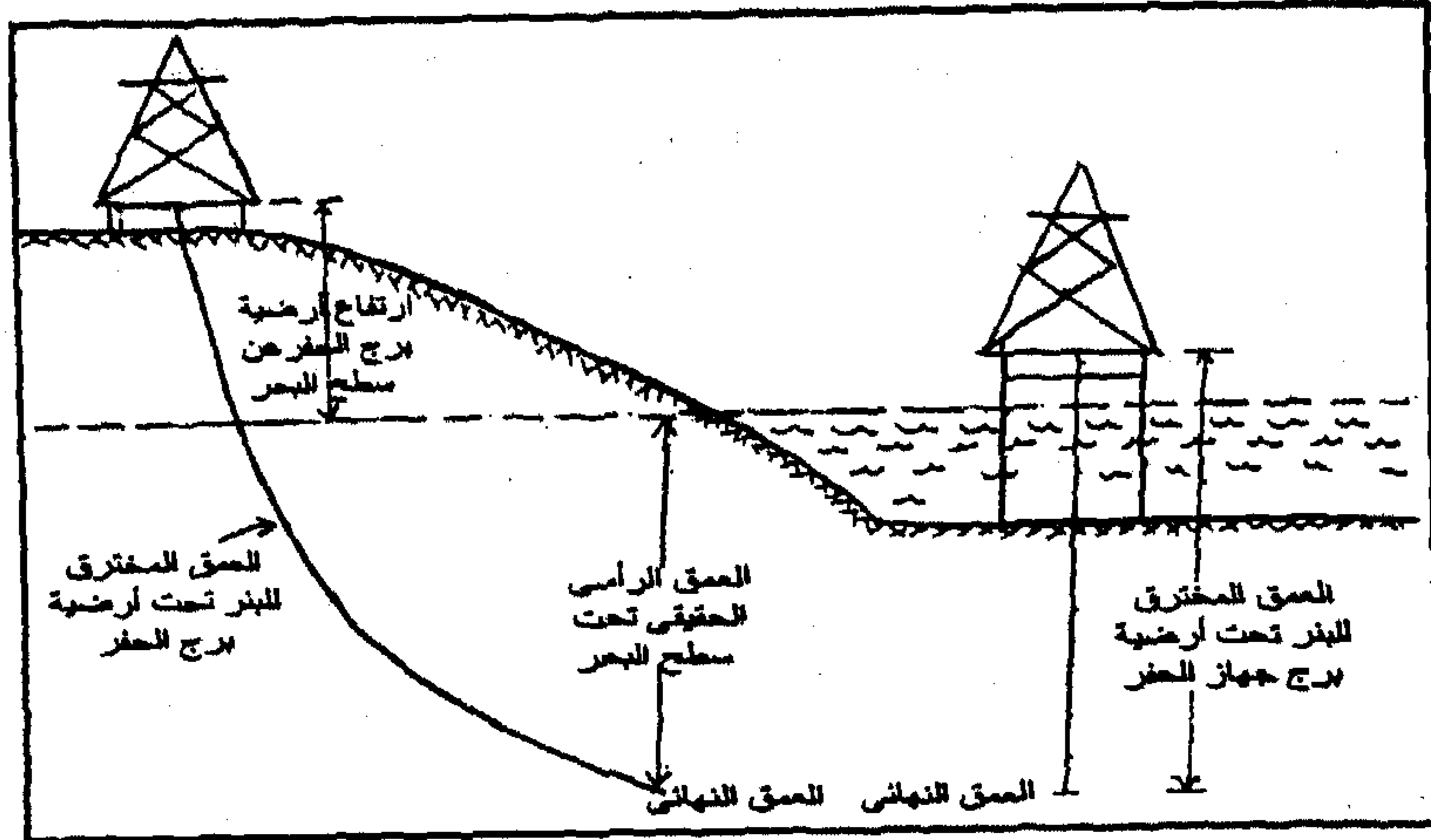


شكل ١٦-٦: نماذج لمسارات آبار أفقية.

ويستهدف الحفر الأفقي الامتداد الجانبي للخزانات الجوفية خاصة إذا كانت رقيقة السمك وذات حجم محدود من الهيدروكربون، مما يجعل هذا الحفر الأفقي مثالياً في تصريف هذه الخزانات إذا ما تحدد المسار الأمثل لمثقب الحفر خلالها، ولهذا السبب تعّرف آبار الحفر الأفقي بآبار الصرف الأفقي horizontal drain wells، وتستخدم هذه الآبار أيضاً عند حفر التكوينات المحكمة tight وذات النفاذية المنخفضة بغرض تعظيم الاستخلاص الأقصى للهيدروكربونات من الخزان الجوفي وأيضاً بهدف منع حدوث ظاهرة التمخرط coning التي ينتج عنها غازات ومياه زائدة أعلى وأسفل خزان الزيت، وللعلم فإن تكلفة حفر آبار الصرف الأفقي لا تختلف كثيراً عن حفر مثيلاتها الرأسية ولكن المشكلة هي صعوبة إجراء التسجيلات الكهربائية وعملية الإنجاز للبئر.

ويندرج تحت تقنية الحفر الأفقي أيضاً ما تسمى بمجموعة الآبار الجانبية أو الجانبيات laterals والتي تتفرع من البئر الأم لتضرب نُطُقاً معينة بهدف زيادة معدلات الإنتاج من البئر الأصلية (راجع الشكل ١٦-٥).

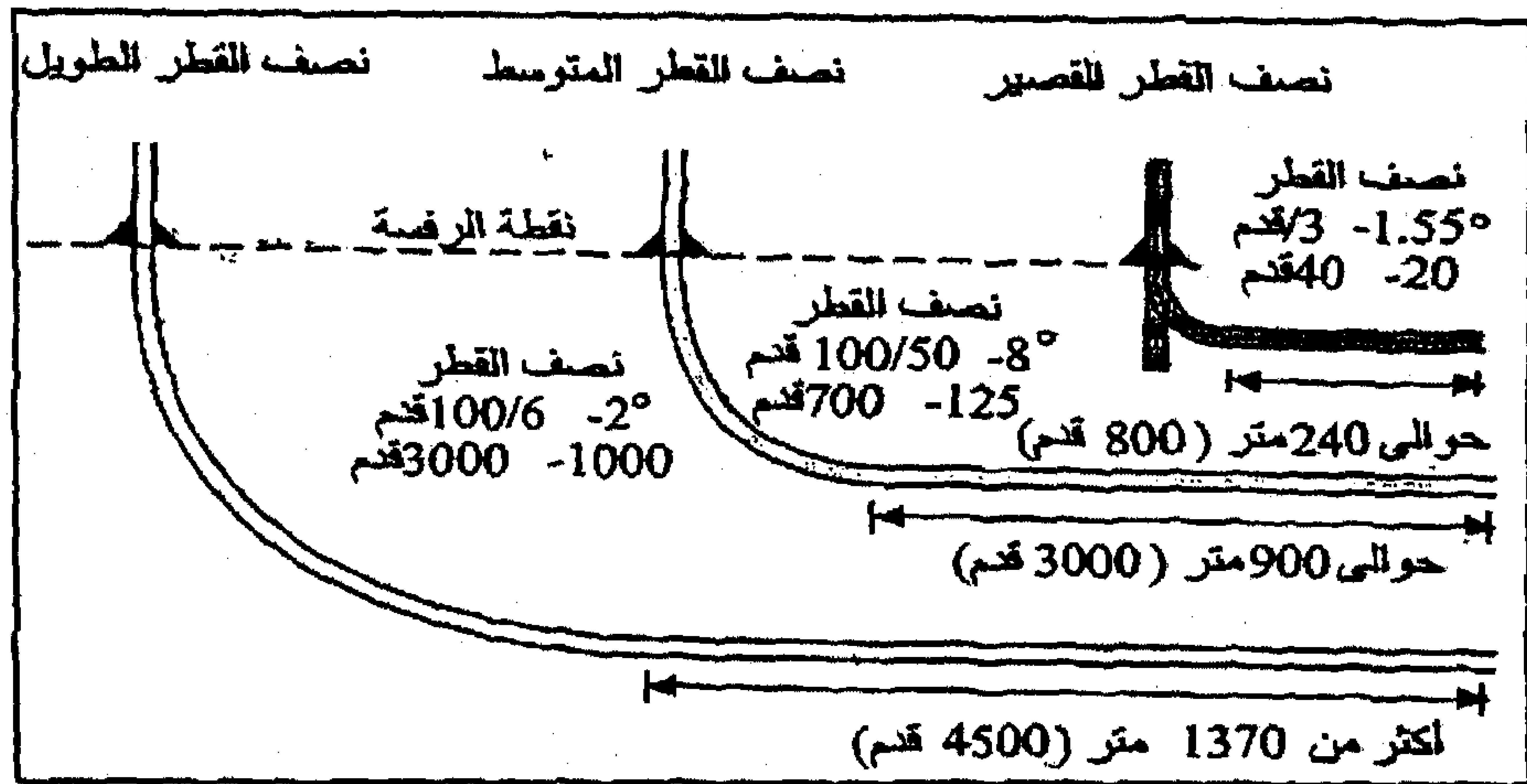
وفي جميع الأحوال فإن عمق البئر يمكن قياسه كعمق كلي total depth (TD) من واقع بيانات تسجيلات الآبار أو الحفر، أما العمق الرأسي الحقيقي true vertical depth (TVD) فهو ذلك المبين بالشكل ١٦-٧ ويكون في الآبار المائلة أقل من العمق الكلي بسبب انحراف البئر وميلها.



شكل ١٦-٧: قياسات العمق في الآبار الرأسية والمائلة.

ولقد كان لتطور أدوات وعمليات المسح الاتجاهي directional surveys داخل الآبار التي يجري حفرها الفضل في تحديد الامتداد الجانبي للخزان بصورة دقيقة وبالتالي ضمان سير المثقب داخل الخزان المعني دون أية انحرافات خارجة إلى ما يعلوه أو يسفله من طبقات، وكذا نقل وضع المثقب إلى سطح الأرض أثناء عملية الحفر، وهي التقنية التي تعرف بالقياسات أثناء الحفر measurements while drilling (MWD) والتي تتمثل أساساً في تحديد ميل واتجاه المثقب داخل البئر، بالاضافة إلى قياس بعض الخصائص البتروفيزيائية للخزان الجوفي بواسطة أدوات التسجيل الكهربائي المصاحبة والتي تعرف بالتسجيلات أثناء الحفر logging while drilling (LWD) والتي أدخلت حديثاً إلى هذه المسوح لتحقق بالتالي الحصول على المعلومات البئرية في زمن حقيقيreal time حيث يتم تركيب هذه الأدوات بالقرب من المثقب والتي تبعث باستجاباتها مع تقدم المثقب داخل التكوين الجيولوجي، ومن بين تلك الأدوات أجهزة تسجيل أشعة جاما والمقاومة الكهربائية والكثافة والمسامية ويتم نقل المعلومات الواردة من هذه الأجهزة عن طريق سائل الحفر في هيئة نبضات وإشارات كهربائية ترسل إلى السطح حيث تستقبلها أجهزة التسجيل المعدة لهذا الغرض (راجع الفصل ١٨).

ومن حيث اختلاف أقطارها ومعدلات بناء زاوية الميل تنقسم الآبار الأفقية إلى ثلاثة أنواع وهي الآبار ذات أنصاف الأقطار القصيرة short radius والآبار المتوسطة القطر medium radius والآبار الطويلة القطر long radius كما هو مبين بالشكل ١٦-٨، وتعتبر الآبار المتوسطة القطر هي المفضلة وذلك بسبب إمكانية حفرها بشكل أسهل وآمن، وبالتالي يمكن تسجيلها وإكمالها باستخدام التجهيزات النموذجية المعتادة، ويكون معدل بناء زاويتها بين ٨ إلى ٥٠ درجة لكل ثلاثين متراً (مائة قدم) وبنصف قطر بين ٤٠ إلى ٢٠٠ متر (١٢٥ - ٧٠٠ قدم)، وامتداد أفقي حوالي ٩٠٠ متر (٣٠٠٠ قدم) في المتوسط مقارنة بالنوعين الآخرين المبينين بالشكل. وعادة ما تصل إنتاجية الآبار الأفقية إلى ما بين ٣-٥ أضعاف ما تنتجه البئر الرأسية في حالة الزيت، وما بين ٥ إلى ٢٠ ضعفاً في الآبار المنتجة للغاز.



شكل ١٦-٨: رسم تخطيطي لأنصاف قطر الآبار المختلفة في الحفر المائل.

الحفر الممتد:

هو نوع آخر من الحفر المائل الذي يبلغ فيه المقطع الأفقي من البئر على الأقل ضعف المقطع العمودي لها، ويمكن باستخدام التقنيات الحديثة الوصول إلى نسبة أربعة أضعاف وهو أمر يدل على قدرة هذه التقنيات في إحداث انجازات هائلة في هذا المجال بالرغم من الصعوبة الكبيرة التي قد تعترض عملية الحفر بهذا الأسلوب، والذي يحتاج إلى تصميم جيد وآمن.

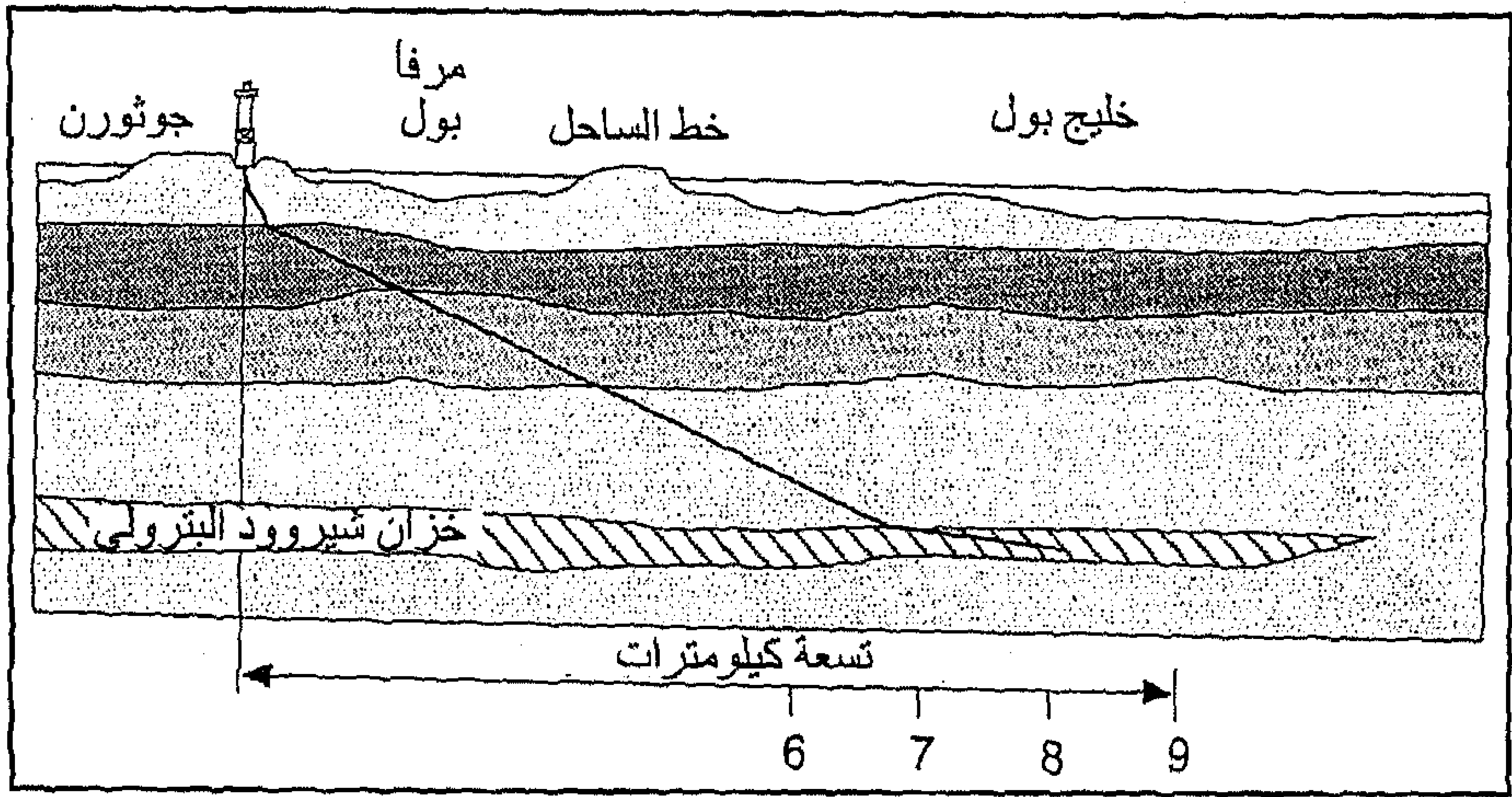
ويمكن استخدام حفر الوصول الممتد extended reach drilling (ERD) في عدد من الحالات نذكر منها:

- وجود عوائق وقيودات سطحية.
- وجود تجمعات بترولية هامشية (حدية) على مسافة عدة كيلومترات من المنصات platforms أو مجموعات الآبار القائمة.
- الرغبة في تخفيض عدد المنصات البحرية.

وبالطبع فإن زاوية الانحراف العالية (غالباً حتى ٨٥°) بالإضافة إلى طول المقطع الأفقي وامتداده يعرضان سلسلة أنابيب الحفر إلى السحب وعزم اللي، كما أن تنظيف البئر وإزالة الحُفارة منها وسمنتة القيسون يكون أكثر صعوبة بسبب تأثير قوى الجاذبية مقارنة بالآبار ذات الزاوية المنخفضة، وبالتالي فإن حفر الآبار الممتدة يحتاج إلى أجهزة حفر ثقيلة وتجهيزات خاصة مقارنة بالآبار الأخرى حيث يستغرق الحفر وقتاً أطول مما يعرض البئر إلى المخاطر والتي ينبغي أخذها في الإعتبار عند التعامل مع هذا النوع من الآبار، وفي هذا الصدد تستخدم عادة أجهزة الحفر ذات الدفع من أعلى top drive راجع شكل ١٤-٥ بدلاً من الطاولة الرحوية بالإضافة إلى استخدام الموتورات (المولدات) داخل البئر في عملية التحريك.

وليس مستغرباً أن تكلفة الحفر الممتد أعلى كثيراً من حفر الآبار المعتادة، ولكن اقتصاديات المشروع تكون في مجملها أفضل كثيراً من استخدامات الأساليب العادية.

وعلى سبيل المثال ذلك المشروع الذي قامت به شركة بي بي أوموكو BP Amoco لتنمية الجزء البحري لحقل ويتش فارم Wytch Farm للبترول (الموجود تحت مرفأ بول Poole Harbour بمنطقة دورست Dorset بالمملكة المتحدة) من موقع أرضي، حيث استهدفت الآبار الخزان المنتج على عمق رأسي يبلغ ١٥٠٠ متر ومقطع أفقي لأكثر من ١٠ آلاف متر (شكل ١٦-٩) وكان البديل هو بناء موقع حفر على جزيرة اصطناعية في خليج بول Poole Bay وقد أدي ذلك إلى توفير مبالغ هائلة والدفع إلى تقديم بدء الإنتاج بالحقل لعدة سنوات عن الموعد الذي كان مخططاً له.



شكل ١٦-٩: قطاع جانبي في حقل ويتش فارم للبترول بالمملكة المتحدة يوضح مثالاً للحفر الممتد

حفر الآبار النحيلة (الرفيعة):

تعرف البئر النحيلة أو القليلة القطر slim hole بأنها البئر التي يصل قطرها إلى سبعة بوصات (١٨ سم) أو أقل على امتداد ٩٠ ٪ أو أكثر من طولها، وقد شاع هذا النوع من الآبار في الصناعة التعدينية، ولكن وعلى مدى السنوات الأخيرة استطاع العلماء تقديم هذا الأسلوب إلى الصناعة البترولية من خلال استحداث مكونات خاصة لأجهزة الحفر وكذلك أدوات بإمكانها التسجيل داخل الآبار النحيلة وأيضا إكمالها إذا ما تطلب الأمر ذلك، مما يقدم مزايا لحفر الآبار مقابل تكلفة أقل كثيراً من الحفر المعتاد وقد تصل الوفورات إلى ما بين ٤٠ و٦٠ ٪، ومن مزايا هذه التقنية على وجه الخصوص أنها لا تحتاج إلى وقت طويل لتجهيز موقع الحفر، كما أن معدات الحفر والتجهيزات الأخرى تكون أقل حجماً ووزناً (راجع الجدول ١٦-١) مما يسهل تحريكها إلى الموقع حتى بالطائرات العمودية إذا كانت المواقع نائية، كما من المتوقع أن تكون تكلفة المواد المستهلكة مثل مثاقب الحفر وكميات الأسمنت وطين الحفر أقل كثيراً من أعمال الحفر المعتادة وحيث تنخفض بالتالي كميات النفايات المطلوب التخلص منها بسبب آثارها البيئية السلبية، وفيما يلي مقارنة بين العناصر الأساسية في أسلوب الحفر في الآبار التقليدية والآبار النحيلة ويوضح مزايا هذا الأخير.

جدول ١٦-١: مقارنة بين أسلوبي الحفر التقليدي وفي الآبار النحيلة.

جهاز الحفر	الآبار التقليدية	الآبار النحيلة
قطر البئر (بوصة)	٨.٥	٣-٦
سلسلة أنابيب الحفر(طن)	٤٠	٥-٧
وزن جهاز الحفر (طن)	٨٠	١٠
مساحة موقع الحفر(٪)	١٠٠	٢٥
الطاقة المحركة (كيلووات)	٣٥٠	٧٠-١٠٠
سعة خزان الطين (برميل)	٥٠٠	٣٠
حجم اتساع البئر (برميل لكل ألف قدم)	٦٠	٦-١٢
حجم طاقم الحفر	٢٥-٣٠ .	١٢-١٥؛

وقد يستخدم حفر الآبار النحيلة في استكشاف المعادن حيث يكون المطلوب أخذ عينات لبيةcores بدلاً من الحفارات الصخرية، والتي تزود العاملين في هذا المجال بالمعلومات التحتسطحية التي قد يمكن الاستفادة منها أيضاً في أعمال البحث والتنقيب عن البترول.

الحفر بالأنبوب الملفوف:

هو نوع خاص من حفر الآبار النحيلة، وبينما يتم إنجاز عمليات الحفر باستخدام وصلات من أنبوب الحفر فإن هذا الأسلوب يستخدم أنبوباً مرناً وغير ملحوم seamless ومصنوعاً من الصلب العالي الدرجة وذا قطر يتراوح بين ١.٧٥ و٣.٥ بوصة، ويلف هذا الأنبوب coiled tubing على بكرة كبيرة بمؤخرة الشاحنة المحمولة عليها (راجع شكل ٢٢-٢)، ويبلغ طول الأنبوب أحياناً ٥٨٠٠ متر، وفي نهايته مثقب الحفر والذي يتم إدارته بواسطة موتور توربيني، كما يتم إنزال الأنبوب تحت ضغط معين، وبالتالي فإنه يمكن استخدامه في الآبار ذات الضغط العالي.

ومن مزايا هذه التقنية أنها لا تحتاج إلى تناول خاص للأنبوب كما يمكن التحكم الجيد أثناء إجرائها ومن ثم ارتفاع معدل الاختراق للبئر وتجنب حدوث أضرار للتكوين

الجيولوجي بالإضافة إلى قلة الآثار البيئية السلبية وكذا قلة تكاليف تجهيز الموقع والمعدل اليومي للحفر وتحريك جهاز الحفر إلى الموقع، والإمكانية الجيدة عند إكمال البئر بالأنبوب الملفوف مقارنة باستخدام أنبوب الإنتاج المعتاد والمكون من الوصلات المتعددة.

الحفر بالهواء والرغوة:

يستخدم أسلوب الحفر بالهواء air drilling جهاز الحفر الرحوي الذي تم تزويده بضاغط للهواء مركب على دعامة خاصة أو مقطورة، ويقوم الهواء بوظيفة سائل الحفر حيث يضخ هذا الهواء داخل سلسلة أنابيب الحفر والمثقب، ويعمل الهواء المضغوط على التقاط ورفع الحفارة الصخرية من قعر البئر والدفع بها من خلال نظام خاص إلى الخارج، ويتميز الحفر بالهواء بمعدل اختراق جيد مما يحول دون إحداث ضرر بالطبقة المنتجة، ونظراً لعدم تكون القشرة الطينية بسبب غياب طين الحفر يكون هناك عدم استقرار للبئر أثناء الحفر، كذلك فإن الحفر بالهواء لا يمكن له التحكم في تدفق الموائع إلى البئر، كما أن الغاز الطبيعي الذي يتدفق من البئر مختلطاً بالهواء قد ينتج عنه اشتعال عند سطح الموقع.

أما الحفر بالرغوة foam drilling فهو يشبه الحفر بالهواء حيث تستخدم المنظفات detergents مثل الصابون بعد مزجها بالماء، وضخ المزيج الناشئ بواسطة مضخة صغيرة إلى الهواء الدائر داخل البئر، ومن شأن الرغوة أن تؤدي وظيفة أفضل من الحفر بالهواء في رفع الحفارة من قعر البئر أثناء حفرها.

وبالطبع فإن هذين الأسلوبين غير شائعين في عمليات استكشاف وإنتاج البترول وربما كانت جدواهما في حالة الآبار الضحلة وحيث لا تصادف هناك مشكلات جادة.

وفي جميع الأحوال فليس من المعقول أن يتم حفر هذه الآبار العميقة والتي يتجاوز عمقها آلاف الأقدام في جولة واحدة. أن حفر البئر أمر عالي التقنية ويجري في إطار تصميم معتمد well design ويختلف من بئر لأخرى حسب ظروفها من حيث نوعية الصخور المتوقع اختراقها ونوع سائل الحفر المطلوب وقطر ونوع المثقب المستخدم، كما أن ترك البئر دون حمايتها يعرضها للإنهيار وفقد سائل الحفر وكذلك تسرب الموائع من داخل البئر إلى الخارج وربما أيضاً تنقل الموائع من طبقة لأخرى، ومن هذا المنطلق كان لا بد من تغليف البئر على وجه السرعة سعياً لاستقرارها وأمانها وذلك بواسطة أنابيب من الصلب (القيسون) وهو ما سوف نتناوله بقدر من التفصيل في فصل قادم.

الفصل السابع عشر
السلامة والبيئة في النشاط البترولي

مقدمة:

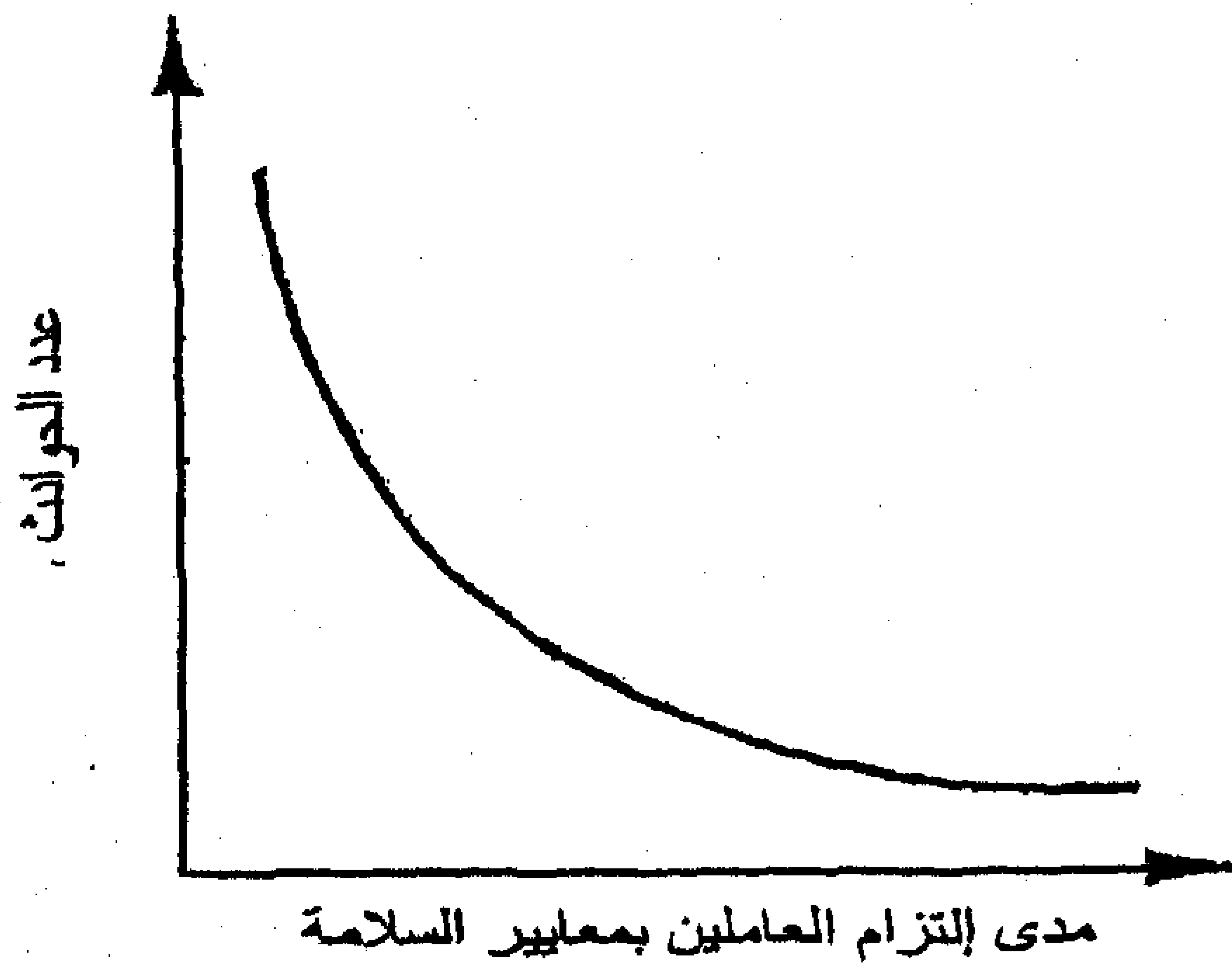
أصبحت السلامة والبيئة safety and environment من القضايا والاهتمامات الساخنة في عالمنا المعاصر، ولعل في حادثة بحر الشمال في حقل بيبر ألفا Piper Alfa للبترول عام ١٩٨٨ ما يعتبر نقطة فارقة دعت إلى ضرورة إحداث تغييرات جوهرية في كيفية إدارة السلامة على المستوى العالمي أثناء البحث والتنقيب وإنتاج البترول والغاز الطبيعي، وكانت المنصة البحرية العاملة في ذلك الحقل والتي تبعد حوالي ٢٠٠ كيلو متر إلى الشمال الشرقي من أبردين بالمملكة المتحدة، قد تعرضت إلى تسرب مفاجئ للغاز المنبعث من إحدى الآبار أتبعه انفجار مروع أودى بحياة ١٦٥ شخصاً من بين ٢٢٦ كانوا يعملون بالموقع، وهو رقم كارثي للغاية تجاوز الـ ٧٠٪ من حجم العمالة هناك.

ولقد أدركت الشركات العاملة في مجالات الاستكشاف والإنتاج أن الإدارة الجيدة للسلامة والبيئة لها تأثيرها الفعال ليس فقط من الناحية الاقتصادية بل وأيضا فيما يتعلق بالعامل البشري وأمنه وسلامته، وعلى مدى الفترة الماضية تطور العديد من الأساليب الهادفة إلى الحفاظ على مواصلة أنشطة العمل في سلام وأمان وحماية العاملين وتجنيبهم الأخطار الناشئة عن التشغيل، كما أدركت الشركات أن التهاون في أداء العمل وعدم الالتزام بمعايير السلامة قد تكون له عواقب وخيمة والدليل على ذلك ما شاهده العالم في ٢٠ أبريل ٢٠١٠ بخليج المكسيك بالقرب من ولاية لويزيانا الأمريكية حيث وقع حادث جسيم على المنصة البحرية تعرض له جهاز الحفر ديبووتر هورايزون Horizon Deepwater الذي كان يعمل لحساب شركة بريتش بتروليم أدى إلى تسرب كميات هائلة من الزيت الخام فاقت المليون برميل في مياه الخليج مما عرض المنطقة إلى أخطار بيئية جسيمة أثرت على الحياة البحرية والبرية بسبب تلوث المياه بالزيت الذي كان يتدفق بمعدل ما بين ٦٠-٨٠ ألف برميل في اليوم وظلت أعمال إخماد تسرب الزيت والنيران المشتعلة بالمنصة لأكثر من ثلاثة أشهر ناهيك عن الخسائر المالية الفادحة التي قدرت ببلايين الدولارات، وكان السبب الرئيس في هذا الحادث هو التهاون في الأداء وعدم الالتزام باشتراطات السلامة.

الوعي من أجل السلامة:

يقاس أداء السلامة داخل المنشآت العاملة بعدة طرق أكثرها شيوعاً هو تسجيل عدد الحوادث الناجمة أو عدد الإصابات التي ينتج فيها فقدان للوقت lost time incidents يتسبب عنه إبعاد للعامل عن عمله ليوم أو أكثر، كذلك فهناك مقياس آخر يرتبط بما تكلفته المنشأة من أضرار مالية بسبب تلك الإصابات.

ولتحسين أداء السلامة بين العاملين تقوم المنشآت بوضع اللوائح والصيغ التي تهدف إلى تحفيز العاملين بالقيام بواجباتهم بصورة آمنة ودون تعرضهم للأضرار والمخاطر المحتملة، ولضمان الأداء الجيد وعلى صعيد متواصل يرى المختصون أن تكون البداية مع الإدارة العليا للمنشأة وإلزامها باللوائح والضوابط المتفق عليها، على أن تعمل هذه الإدارة في الوقت نفسه على نشر تلك اللوائح على المستويات الأدنى وضرورة التقيد باشتراطات السلامة المطلوبة، ويوضح الشكل ١٧-١ مدى التزام العاملين بمعايير السلامة وانعكاس ذلك على تزايد أو تناقص نسب الحوادث والإصابات فكلما تزايد الالتزام تراجعت الإصابات والعكس صحيح.



شكل ١٧-١: الالتزام بمعايير السلامة للعاملين.

ويجدر التنويه بأن التزام العاملين بأداء السلامة لا ينبغي أن يكون لمجرد انصياعهم للتعليمات دون اقتناعهم الشخصي بمفاهيم السلامة، وأن على الإدارة العليا أن تقوم أيضاً بالتحفيز والتشجيع المتواصل لبقية المستويات العاملة والسعي من أجل رفع مستوى الوعي الأمني safety awareness لديهم.

ومن ناحية أخرى فهناك الدراسة المتعلقة بالأخطار الناتجة عن التشغيل والتي تعرف بالهازوب HAZOP (hazard & operability study) والتي لها أثرها البالغ في إدارة السلامة حيث تعنى هذه الدراسة بالارتقاء بالوعي الأمني وكيفية تشغيل المعدات والتجهيزات والعمل على تطوير كفاءتها وتأمين سلامة إدارتها وتقليص الأخطار المحتملة من خلال تحديث التصاميم وتجويد المعدات والتجهيزات.

هذا وتتباين الإصابات من حيث الشدة severity ومعدل تكرارها frequency وذلك وفق المعادلتين الآتيتين:

شدة الإصابات= إجمالي الأيام المفقودة / عدد إصابات الوقت الضائع

معدل التكرار= عدد اصابات الوقت الضائع × مليون / إجمالي ساعات التعرض

والجدول الآتي يوضح مثالاً لمعدلات أداء السلامة بإحدى شركات البترول العاملة في مصر وحيث يبلغ إجمالي العاملين بها حوالي ٥٠٠ شخص.

جدول ١٧-١: معدلات التكرار والشدة للإصابات بإحدى الشركات.

السنة المالية	معدل التكرار للإصابات	معدل الشدة للإصابات
١٩٩٤/١٩٩٥	١٢،٩	١٠٥٤،٦
١٩٩٥/١٩٩٦	٤،٣	٥٤٩،٥
١٩٩٦/١٩٩٧	١،٨	٥١،٦
١٩٩٧/١٩٩٨	٠،٥٢	٣٨،١١
١٩٩٨/١٩٩٩	٢،٥٥	٦٤،٦١
١٩٩٩/٢٠٠٠	صفر	صفر
٢٠٠٠/٢٠٠١	صفر	صفر
٢٠٠١/٢٠٠٢	صفر	صفر
٢٠٠٢/٢٠٠٣	١،١	١٣،٩

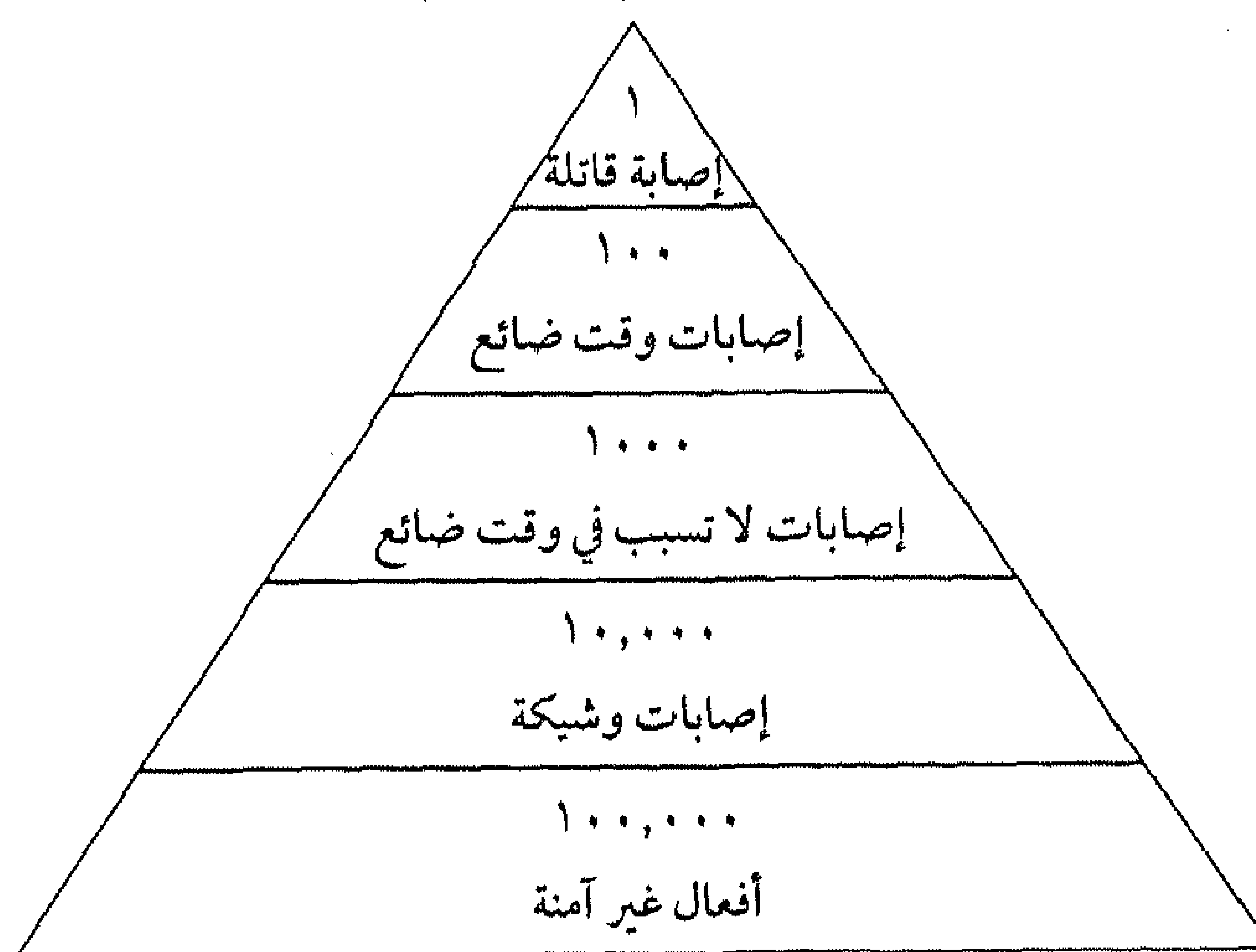
ومن هذا الجدول يتبين كيف أن هذه الشركة قد بذلت جهداً كبيراً في سبيل تقليص معدلات تكرار وشدة إصابات الوقت الضائع لكل من العاملين بها وكذا المقاولة المعاونة بناء على خطة موضوعية وجهد مبذول لتحقيق سياستها تجاه الارتقاء بالوعي الأمني

وخلق بيئة عمل آمنة حيث أمكن للشركة على مدار عشر سنوات خفض معدلات التكرار والشدة بها إلى أكثر من ٩٠٪.

مثلث السلامة:

بناء على الأرقام الإحصائية تصنف الحوادث والإصابات إلى عدة فئات وفق مثلث السلامة safety triangle حيث تحتل الأفعال غير الآمنة unsafe acts قاعدة هذا المثلث وتتصدر الإصابات القاتلة أو المميتة fatality قمته وبين هاتين الفئتين هناك أنواع أخرى من الإصابات، وحسب هذا التصنيف تعرف إصابات الوقت الضائع LTI (lost time incident) بأنها الإصابات التي ينتج عنها وقت ضائع، وهناك أيضاً الحوادث الوشيكة (الكامنة) near-miss التي لم تنتج عنها إصابات ولكن ربما تتسبب في إحداث إصابات لدى وقوعها، أما الفعل غير الآمن unsafe act فلا يحدث إصابات ولكن قد يدفع إلى إصابات لاحقة.

ومن مثلث السلامة (شكل ١٧-٢) نرى ثمة تباينات في شدة وتكرار الحدث بدءاً من الفعل غير الآمن إلى الإصابة القاتلة، كما أن هذا الفعل غير الآمن قد يؤدي إلى إصابة مميتة وقاتلة ومن ثم لا ينبغي إهمال هذا الحدث والتغاضي عنه وأن يكون التعامل معه بجدية رغم بساطته، والجدير بالذكر أن أغلب الأفعال غير الآمنة تنشأ عن الإهمال من جانب العاملين في اتباع اشتراطات السلامة والتقيد بها، وفي هذا الشأن يتطلب الأمر الارتقاء بالوعي الأمني لدى هؤلاء العاملين وتعظيم تعهداتهم الشخصية.



شكل ١٧-٢: مثلث السلامة.

ولأهمية السلامة والبيئة في النشاط البترولي أصبح من المألوف أن نشاهد تلك اللوحات التي تتصدر مداخل المراكز الرئيسة للشركات العاملة وكذا مواقع الإنتاج بالحقول تحت شعار "السلامة أولاً" والتي تبين أحدث الأرقام والإنجازات التي حققتها تلك الشركات للحفاظ على سلامة العاملين والممتلكات والبيئة المحيطة، كما تضم هذه اللوحات آخر معدلات الإنتاج المحققة وكذا المستهدفة، والشكل ١٧-٣ يعرض نموذجاً لتلك اللوحات بإحدى شركات البترول العاملة في مصر.

شكل ١٧-٣: لوحة بإحدى الشركات العاملة في مصر توضح إنجازات السلامة بالإضافة إلى معدلات الإنتاج اليومية من الخام.

منظومة إدارة السلامة:

تعتمد منظومة إدارة السلامة safety management system على الأسلوب التكاملي في إدراك العمل والتحقق من جودة الأداء، وعادة ما تمتلك المنشآت الكبيرة منهجاً خاصاً بها يتناسب والبيئة المحلية وطبيعة العمليات القائمة، وعلى أي حال فإن منظومة إدارة السلامة تتناول العناصر الأساسية الآتية حتى لو اختلفت في بعض جوانبها:

- الهيكل التنظيمي للمنشأة.
- مستويات الإدارة المختلفة.

- تقييم السلامة.
- الإجراءات المتعلقة بالتصاميم.
- إجراءات التشغيل والصيانة والإحلالات والطوارئ.
- إدارة السلامة الخاصة بالمقاولة العاملة بالمنشأة.
- دور العاملين في السلامة.
- تقارير الإصابات والحوادث وكيفية الفحص والمتابعة.
- مراقبة ومراجعة نظام التشغيل.
- التفتيش والتقييم والتدقيق الدوري لمنظومة العمل.

إن منظومة إدارة السلامة ليست نظاماً قائماً بذاته بل إنه متكامل مع بقية نظام العمل بالمنشأة، ويمكن لنا مناقشة بعض من عناصر المنظومة لتوضيح ذلك الأمر:

- **مراجعة وتدقيق أنشطة العمليات**: وقد يتم ذلك عن طريق فريق عمل من خارج أو داخل الشركة يتكون من أفراد مؤهلين، وبالطبع فإن ما سوف يقدمه هذا الفريق من ملاحظات وتوصيات سوف يعمل على تحسين مستوى الأداء وتقليص ما قد ينشأ من أضرار.
- **المقاولون**: يقوم المقاول بعمليات التشغيل نيابة عن الشركة وذلك لما يتمتع به أفراده من مهارات مهنية تتطلبها احتياجات العمل، ويختلف حجم عمالة المقاولة حسب الحاجة إليها فربما كان عدد الأفراد صغيراً أو كبيراً وربما استغرق العمل المنوط بهم أياماً محدودة أو ربما تجاوز الشهور، ونظراً لانخراطهم في الأعمال الموكلة إليهم كان لا بد من تعريفهم بطبيعة العمل ولوائح السلامة وقد يتطلب الأمر إعداد دورات تدريبية لهم وتعريفهم بمنظومة إدارة السلامة بالشركة أو المنشأة.
- **الإجراءات الخاصة بالتصاميم**: وتهدف هذه الإجراءات إلى إدخال عناصر السلامة على المعدات والتجهيزات المستخدمة وذلك لتلافي الأخطار الناجمة عن التشغيل

وبالتالي تقليص المخاطر المحتملة، ويمكن أن يتم ذلك من خلال خطوات ثلاث تستهدف الأولى منها تحديد ووصف الأضرار المحتملة وتركز الخطوة الثانية على التحليل الكمي للمخاطر وحجم ما قد ينتج من تداعيات بسبب الأضرار الناشئة. أما الخطوة الثالثة فتهدف إلى اتخاذ الإجراءات اللازمة لتقليص المخاطر إلى الحد المقبول والمتعارف عليه والتي لا تلحق الضرر بالعامل البشري.

ولفاعلية الإجراءات فإنه يلزم أن تكون مدونة وذلك لضمان سير الأنشطة المختلفة على النحو المطلوب، فقد تبين أن أغلب الحوادث كانت قد حدثت لعدم اتباع إجراءات السلامة المكتوبة.

البيئة والتلوث:

تعتبر إدارة الأثر البيئي environmental impact لأي مشروع إحدى الاهتمامات الرئيسة للشركة صاحبة المشروع خاصة تلك العاملة في مجال البحث والتنقيب وإنتاج البترول والغاز الطبيعي ليس من أجل الوفاء بالمتطلبات التشريعية في البلد المضيف ولكن أيضاً لضمان أن يكون هذا المشروع استثماراً جيداً وذلك للأسباب التالية:

- أن تكلفة المشروع في الحدود المقبولة مالياً.
- أن المشروع يمكن أن يقدم نموذجاً يحتذي به.
- أن المشروع ضروري لضمان استمرارية العمليات بالمنطقة.
- كما يمكن أن يكون المشروع مساعداً في الحصول على امتيازات جديدة بالمنطقة لمصلحة الشركة العاملة.

ويكون الأداء البيئي للشركات الصناعية في العادة ملتزماً باللوائح التشريعية ليس فقط لدى الحكومة المضيفة بل أيضاً لدى المجتمع المدني عند توافر المعلومات وازدياد مستويات الوعي البيئي. وترى الشركات الكبرى أن إدارة شئون البيئة لديها ستكون ذات تأثير فعال في التحكم بسير العمليات لديها في المستقبل، كما أن الموافقة على القروض من المصارف لشركة ما لتمويل أحد مشروعاتها تكون عادة مشروطة بإدارة جيدة لشئون البيئة بهذه الشركة ووفق المعايير السائدة هناك والتي قد تختلف من منطقة لأخرى، وعلى العموم هناك اشتراطات عادة لا يمكن التنازل عنها عند عملية الإقراض. وبسبب تعاظم

النشاط الاستكشافي والإنتاجي براً وبحراً للشركات العاملة أصبحت إدارة شئون البيئة الشغل الشاغل لهذه الشركات من أجل خلق بيئة آمنة ونظيفة ودون تداعيات سلبية مؤثرة والالتزام بمتطلبات واشتراطات السلامة طبقاً للمعايير المطبقة في هذا الشأن.

تقييم الأثر البيئي:

يهدف تقييم الأثر البيئي environmental impact assessment (EIA) إلى تسجيل وتوثيق التأثيرات الفيزيائية والحيوية والاجتماعية والصحية على النشاط المزمع إقامته مما سوف يساعد صانعي القرار على إدراك ما إذا كان هذا النشاط مقبولا أم لا؟ وإلا استلزم الأمر البحث عن بدائل أخرى، وبالنسبة لمجالي الاستكشاف والإنتاج يعتبر هذا التقييم من العناصر الضرورية قبل الشروع في بدء النشاط وعلى الأخص في الحالات الآتية:

- نشاط المسح السيزمي.
- حفر الآبار الإنمائية وإقامة تسهيلات الإنتاج.
- إخلاء الموقع وهجره بعد الانتهاء من استغلاله.

ولكي يكون هذا التقييم ذا موضوعية ومصداقية فإنه عادة ما يتم بواسطة فريق عمل من الإخصائيين يعملون لحسابهم أو عن طريق مؤسسات خارجية، ولا ينحصر هذا التقييم بين الخبراء المهنيين ولكن يتطلب التشاور مع الجهات الرسمية وممثليها بالوزارات الحكومية خاصة تلك المعنية بشئون البيئة وكذلك هيئات الصيد والأغذية والزراعة والري بالإضافة إلى هيئات المجتمع المدني والصحة والسكان بل ربما تطلب الأمر الرجوع إلى المحليات وأيضاً مراكز التعليم والجامعات والبحث العلمي.

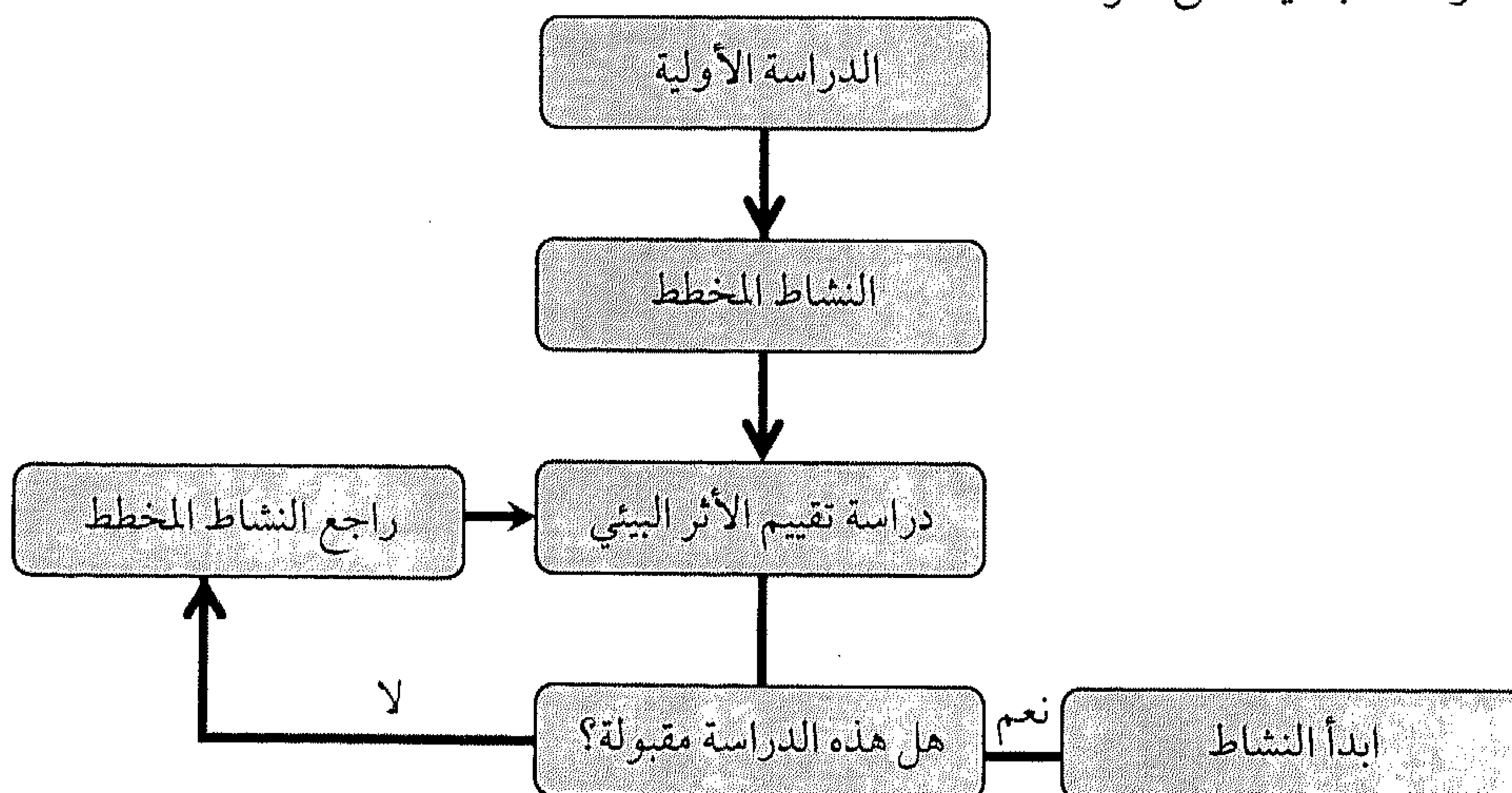
والرسم التخطيطي شكل ١٧-٤ يوضح خطوات تطبيق دراسة تقييم الأثر البيئي، وعند إجراء هذه الخطوات لا ينبغي أن يساء تقدير الوقت المنصرم بين الدراسة الأولية ودراسة تقييم الأثر البيئي حيث تتناول الدراسة الأولية وصفاً للمعالم الرئيسة للحياة البرية والبحرية وكذلك تضاريس قاع البحر إن كان البحث في المياه، وفي المناطق ذات الطقس المتغير لابد أن تغطي الدراسة التغيرات المناخية على مدار السنة. كذلك فإن دراسة تقييم الأثر البيئي تتوقف على حجم وطبيعة المنطقة تحت البحث وكذلك الأعمال السابقة بالمنطقة والتي قد تستغرق في العادة نحو ستة أشهر.

وتعتبر دراسة تقييم الأثر خطوة أساسية في تطوير المشروعات ولا ينبغي أن تحذف من الجدول التخطيطي للمشروع المزمع إقامته، كذلك فإن نتائج التقييم عادة ما توضع في تقرير يعرف بتقرير حالة الأثر البيئي environmental impact statement(EIS) والذي يناقش التأثيرات السلبية والإيجابية الناجمة عن النشاط، ويعتبر هذا التقرير مكوناً هاماً في شأن اتخاذ القرار أو التحول إلى خيار آخر.

عملية تقييم الأثر البيئي:

تعتبر دراسات تقييم الأثر البيئي في الأساس عملية منهجية تتناول التداعيات البيئية للمشروعات المخطط لها مع التركيز على الأضرار المحتملة وكيفية تلافيها، غير أنه مع الوقت تعاظم الهدف من تلك الدراسات وأصبحت تستخدم آليات وتقنيات جديدة يمكن أن تضيف قيمة للبيئة والمجتمع، ومن ثم فقد اعتبرت دراسات تقييم الأثر البيئي عملية ديناميكية تتغير تبعاً للدوافع والضغوط البيئية التي يفرضها واقع الحياة المعاصرة.

وفي المراحل الأولى من تقييم الأثر البيئي يتم إجراء دراسة قاعدية تتضمن وصفاً للمعالم الفيزيائية والحيوية والبيئة الاجتماعية التي قد تتأثر بسبب الأنشطة الإنمائية بالمنطقة قيد البحث،كما تسبق هذه الدراسة عملية التدقيق والمراجعة الخاصة بالمشروع المزمع إقامته، وقد يتطلب الأمر إجراء دراسة قاعدية جديدة إذا لزم الأمر في مرحلة متقدمة من المشروع وذلك بهدف المساعدة على تحسين التأثيرات والتنبؤات البيئية بالرغم مما ستتكلفه الدراسة الجديدة من أموال.



شكل ١٧-٤ : تقييم الأثر البيئي.

وفي عملية تقييم الأثر البيئي EIA process هناك مراحل مهمة حظيت باتفاق عام بين المهتمين في تلك المجالات وتتلخص فيما يلي:

- **مرحلة التصفية** screening: وتجري بهدف اختيار أي من المشروعات التي سوف تخضع للتقييم البيئي ويتم ذلك تبعا للوائح البيئية المتفق عليها، ومن بين المعايير التي تتناولها هذه المرحلة نوعية وحجم المشروع ومدى حساسيته لقضايا البيئة والمجتمع.
- **تحديد الإطار** scoping: وتتعرض هذه المرحلة لإطار التقييم البيئي وأهم الموضوعات التي ستتطرق إليها الدراسة، وألا تكون هذه الأخيرة مجرد عمل موسوعي يحتوي على بيانات ومعلومات قد يكون بعضها مغلوطاً وغير مؤكد.
- **اقتراح البدائل**: وتسعى هذه المرحلة إلى التأكد من وجود بدائل وخيارات أخرى.
- **وصف المشروع**: ويتضمن توضيحاً للغرض من المشروع وأهدافه وفائدته.
- **إعداد تقرير الأثر البيئي**: متضمناً تحليلاً علمياً للمشروع وشرحاً للتأثيرات البيئية والتنبؤات المحتملة.
- **التواصل مع الأهالي**: وذلك بهدف التأكيد على الجودة ومدى فاعلية الدراسة والتجاوب مع الأهالي وأخذ آرائهم في الاعتبار.
- **الشروح الدورية**: وهو خطوة حيوية في عملية الأثر البيئي للوقوف على ما تم من إجراءات ودراسات.
- **المراجعة**: ويشمل تقييماً منهجياً من خلال مندوب حكومي أو هيئة مستقلة ومعتمدة.
- **اتخاذ القرار**: ويتضمن الاعتبارات التي تخص المشروع وما تم التشاور بشأنه مع الجهات المعنية.
- **المراقبة** monitoring: وتعتبر كآلية هدفها التأكد من الالتزام بالاشتراطات البيئية والسعي من أجل الوصول إلى الجودة المطلوبة.

- التدقيق auditing: وتهدف هذه المرحلة إلى التأكد من الدقة العلمية للتنبؤات ذات الأثر البيئي وأيضا التأكد من كفاءة الإدارة المعنية، وعمل مقارنات بين مخرجات النتائج الفعلية والتنبؤات للوقوف على مدى جودة هذه التنبؤات والعمل على تحسينها بشكل متواصل تحقيقاً للغرض.

امثلة من المشكلات البيئية:

لقد أدى التقدم الكبير الذي أحرزته البشرية في مجالات العلم والتكنولوجيا إلى إحداث خلل بل تدهور في مكونات البيئة المحيطة بنا في مناحي الحياة المختلفة ونحن لسنا هنا بصدد مناقشة هذه الأمور بالتفصيل فذلك خارج عن نطاق هذا الكتاب ولكنا سوف نقصر الحديث على بعض الأمثلة التي شاهدناها في مجالات استكشاف وإنتاج البترول والغاز الطبيعي حتى ندرك مدى ما تتعرض له البيئة من أضرار لها تداعيات على عالمنا اليوم، وفيما يلي وصف مختصر لبعض تلك المشكلات:

- **تهوية وحرق الغاز:**

يستقبل الزيت الخام المنتج قبل تصديره في أوعية خاصة ذات شكل أسطواني تعرف بصهاريج التخزين storage tanks وهي مصنوعة من الصلب ومغطاة من أعلى بسقوف خاصة بها منافذ لتمكين الهواء والغازات الأخرى المصاحبة من الخروج gas venting عند تعبئة الصهريج (حوالي ١٠٠ ألف متر مكعب) ويعتبر الميثان الغاز المصاحب الرئيس والذي يعمل عند خروجه إلى الجو على رفع درجة حرارة الأرض وتزايد ظاهرة الاحتباس الحراري greenhouse effect مما يسمح بالأشعة فوق البنفسجية الآتية من الشمس أن تصل إلى سطح الأرض، كذلك فإن حرق الغاز gas flaring الفائض ينتج عنه تصاعد غاز ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء ويتسبب ذلك في تعاظم ظاهرة الاحتباس الحراري ولو أن الضرر أقل من حالة انطلاق غاز الميثان، ومن أجل ذلك، وللحفاظ على البيئة وعدم تلوثها، فإن الشركات العاملة تبذل جهوداً ضخمة من أجل تجميع الغاز الفائض لاستخدامه كمصدر للطاقة أو إعادة حقنه داخل الخزان الجوفي للاستفادة منه مرة أخرى.

وبسبب الأضرار التي قد تنجم عن الانبعاثات الغازية في الجو فقد دعت بعض الدول الصناعية والمستوردة للبترول إلى فرض ضريبة مالية تعرف بضريبة الكربون carbon tax بهدف حماية البيئة من التلوث تبدأ بثلاث دولارات للبرميل المكافئ وقد تصل إلى ١٠ دولارات، وفي رأينا أن فرض مثل هذه الضريبة سوف تكون له تداعياته الوخيمة وسوف يؤدي إلى خفض استهلاك البترول ومن ثم إضعاف أسعار البترول القائمة على طاقة إنتاجية كبيرة وسيؤدي ضعف الأسعار إلى التأثير السلبي المباشر على خطط التنمية في الدول المصدرة للبترول مما يشكل ضرراً للمصالح الأساسية لهذه الدول.

- **انبعاثات غازات الكلوروفلوروهيدروكربون:**

تعتبر غازات الكلوروفلوروهيدروكربون من العوامل الجيدة المستخدمة في مكافحة وإطفاء الحرائق غير أن انبعاثاتها لها تأثيراتها السلبية على طبقة الأوزون حيث تعمل على تآكلها ومن ثم تزايد حرارة الأرض، ولقد تضاءل استخدام هذه الغازات لهذاالغرض في الآونة الأخيرة حيث بدأ التعامل مع بدائل أخرى ذات أضرار بيئية أقل شأناً.

- **فصل الماء عن الزيت المنتج:**

عادة ما يكون إنتاج الزيت الخام مصحوباً بالماء الجوفي؛ لذا وجب فصل الماء عن الزيت وبالطبع فإن ذلك لا يكون كاملاً حيث يبقى بعض الماء تقدر النسبة المسموح بها بنحو ٤٠ جزء في المليون، هذا وتتم عملية الفصل في العادة على مواقع الإنتاج وأحيانا عند نقاط النهاية ونظراً لأن هذه النقاط غالباً ما تكون قريبة من مناطق سكنية أو منتجعية فإنه يوصى بإجراء عملية الفصل بعيداً عنها كما يكون من الأفضل لو أمكن حقن الماء المفصول داخل الخزان الجوفي مرة أخرى، مما سوف يقلص كثيراً من حجم التلوث البيئي.

- **تصريف النفايات:**

ينتج عن أنشطة الحفر والإنتاج عدد من المواد غير المرغوبة مثل قراضة المعادن scrap metal والفضلات waste التي يسببها الإنسان ذاته وكذلك الكيماويات الفائضة والوسخ والحمأة الزيتية oil sludges والإشعاعات وغيرها من النفايات، كما أن حفر الآبار الرفيعة (النحيلة) سوف يساعد على تقليص حجم النفايات بالإضافة إلى خفض

تكلفة عملية الحفر مقارنة بالآبار ذات الأقطار المعتادة، كما يمكن لكسارات الحفر حقنها ثانية في فراغات البئر أو أن يتم طحنها جيداً وحفظها من جديد داخل الخزان الجوفي.

إن هذه الأمثلة لا ينبغي أن تدعونا إلى التشاؤم وأن علينا ألا نضخم من حجم التأثيرات السلبية لصناعة البترول على البيئة التي يروج لها البعض ضد هذه الصناعة الإستراتيجية المهمة وما يجري حول فرض ضرائب تحت مسميات متعددة الغرض المعلن عنها هو استخدام حصيلتها في الحد من التلوث الناشئ عن البترول بوجه خاص وفي حماية البيئة بوجه عام، ولكن واقع الأمر أن وحدة الطاقة الحرارية الصادرة عن البترول تقدر عليها ضريبة تبلغ سبعة أضعاف الضريبة التي تقدر على نفس الوحدة الصادرة عن الفحم، علماً بأن الفحم أكثر تلويثاً للبيئة، وعلينا أن نعلم أن مصادر الفحم تتركز في الكثير من الدول الصناعية بخلاف البترول الذي يتركز في ما يقرب من ٦٠٪ من احتياطياته بمنطقة الخليج العربي، فالغرض الأساسي إذاً هو الإقلال من الاعتماد على بترول الشرق الأوسط وتوجيه جزء كبير من الضريبة المفروضة عليه لتشجيع مصادر أخرى للطاقة قد تكون أكثر تلويثاً وإضراراً للبيئة ولكنها تتواجد داخل الدول الصناعية الكبرى.

ولا شك أن مثل هذه التحركات والسياسات سوف يتسبب في إحداث تداعيات سلبية وتحول دون تكثيف وضخ المزيد من الاستثمارات المالية من جانب الشركات في البلدان النامية وحيث ما زالت أراضيها لم تبح بعد بكامل ثرواتها البترولية الدفينة.

الجزء الثالث

الإنتاج وهندسة البترول

الفصل الثامن عشر
تقييم واختبار التكوينات التحتسطحية

البيانات المطلوبة للتقييم ومصادرها:

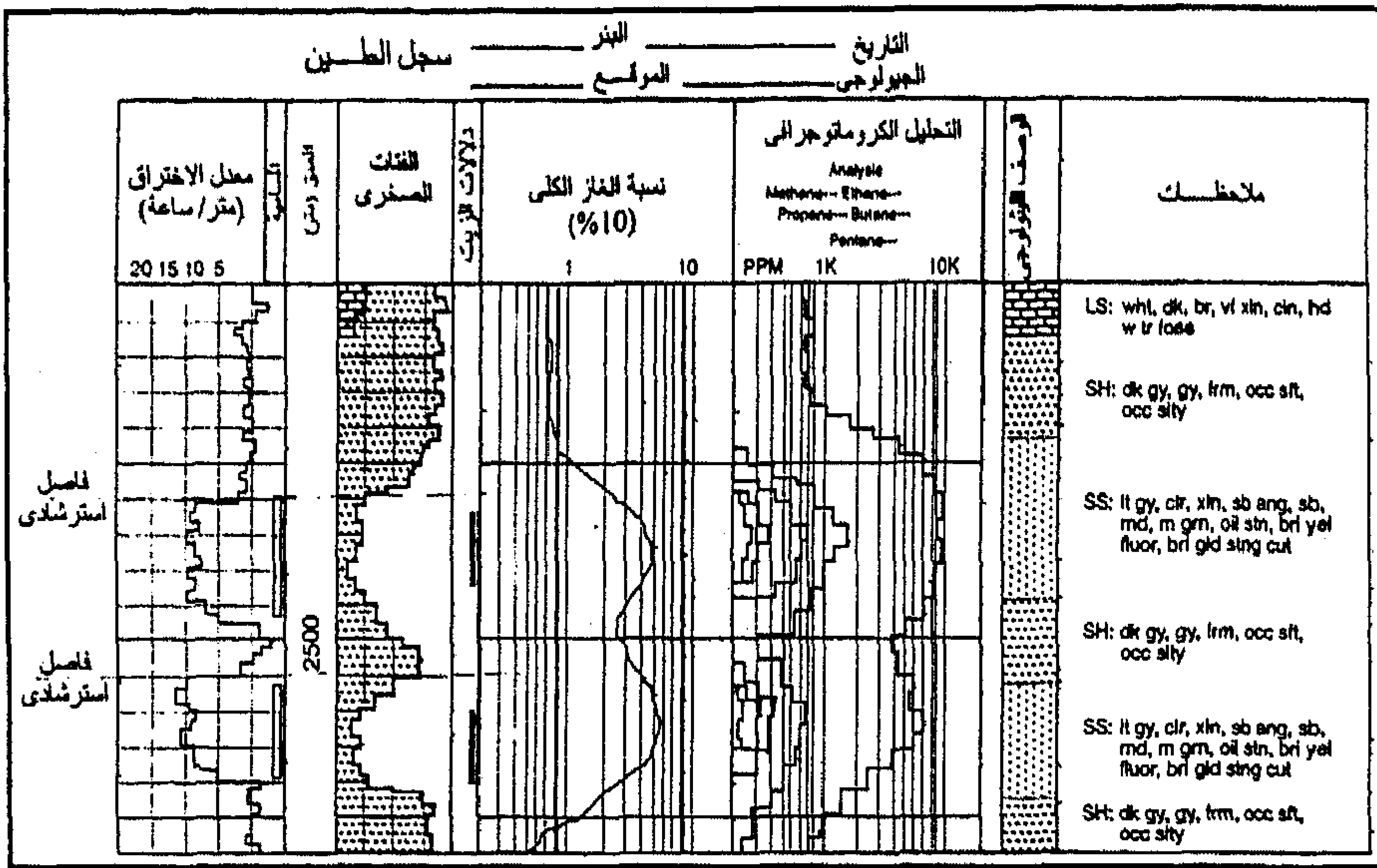
يعتبر حفر البئر خطوة جوهرية في تحديد موقع الخزان الجوفي وما قد يحتويه من بترول، كذلك فإن التزود بالمعرفة الجيدة في إدارة الأمن والسلامة والحفاظ على البيئة هو أمر ضروري لتجنب الآثار السلبية لعمليات الحفر وغيرها، وفي هذا الشأن أيضا يقتضي منا الحصول على المزيد من المعلومات بغية تقدير وتقييم ما في المنطقة من إمكانيات بترولية والتخطيط لإكمال ناجح للبئر وما يستتبع ذلك من الإستغلال الأمثل للحقل المكتشف، ومن أجل ذلك كان لابد من تعيين ما يتم اختراقه من تكوينات جيولوجية وتحديد خصائصها البتروفيزيائية والحصول على أكثر قدر من معلومات حول خصائص الخزان الجوفي وكفاءته الإنتاجية سواء كان ذلك بطرق مباشرة أو غير مباشرة، كما أن الحصول على هذه المعلومات في تاريخ مبكر يفيد كثيراً والاعتماد عليها كبيانات قاعدية قبل الشروع في بدء الإنتاج، وسوف نتناول في هذا الفصل المصادر الرئيسة للمعلومات التي يلزم الحصول عليها لاتخاذ القرار بشأن اختبار البئر من عدمه، وتتمثل هذه المعلومات عادة في عدد من المصادر والسجلات البيانية logs وكذا نتائج تحاليل العينات اللبية والاختبارات البئرية التي تدخل ضمن منظومة التقييم المتعارف عليها.

أدوات التقييم البئرية:

سجل الليثولوجية:

سجل الليثولوجية lithologic or sample log هو رسم بياني على هيئة شريط ورقي يشبه ورق المربعات ويحتوى على المعلومات الجيولوجية الواردة من البئر ويدخل ضمن سجل الطين والذي سيرد شرحه فيما بعد، ويقوم بإعداد هذا السجل الجيولوجي المسئول وهو جيولوجي البئر wellsite geologist، وتدون على رأس السجل بيانات خاصة باسم المالك والشركة العاملة واسم البئر وموقعها وتاريخ بدء العمل وانتهائه، أما متن الشريط فهو على هيئة أعمدة، وعلى أقصى اليسار يوجد مقياس للعمق وعلى يمينه

الرموز الجيولوجية للتكوينات التي تم اختراقها (شكل ١٨-١)، ويعطى للحجر الرملي اللون الأصفر وللحجر الجيري اللون الأزرق، وللطفل اللون الأخضر أو الرمادي، وعند أقصى اليمين هناك مساحة مخصصة لوصف مختصر للصخور يشمل النسيج وحجم الحبيبات ودرجة الفرز ونوع المادة اللاحمة والمسامية وبقع الزيت إن وجدت وكذا المحتوى الطفلي والحفري، ويعتبر الفُتات cuttings والحُفارات الصخرية المصدر الرئيس لبناء السجل الليثولوجي والتي يقوم جيولوجي البئر بمتابعتها وفحصها والتي يحصل عليها من سطح هزازة الطفل shale shaker بعد صعودها إلى هناك، ويتم أخذ العينات بشكل منتظم بواقع عينة من كل ١٠ أقدام (٣ أمتار) جرى حفرها ويكون ذلك على مدى الـ ٢٤ ساعة، وتختصر هذه المسافة عند اختراق الصخور الخازنة ليكون الفحص أكثر تفصيلاً، وبالطبع فعند التعامل مع هذه العينات يقوم الجيولوجي بغسلها لإزالة ما كان قد تعلق بها من طين الحفر ثم حفظها في أكياس من القماش أو الورق استعداداً لفحصها تحت المجهر ذي العدستين binocular، كذلك فإن بقع الزيت إذا ما وجدت داخل العينات المستخرجة فإنها تعطي وهجاً فلورسنتاً إذا ما تعرضت للأشعة فوق البنفسجية وتختلف درجة هذا اللون تبعاً لكثافة وجودة الزيت المختلط بالحُفارة، كذلك فإن هذه البقع الزيتية يمكنها أن تصبغ مذيباً عديم اللون مثل رابع كلوريد الكربون، كما أنه يمكن الاستدلال على وجود الزيت أو الغاز في التكوين الجوفي من الآثار الموجودة في طين الحفر نفسه والعائد إلى السطح بواسطة الفحص بالعين المجردة، أو عن طريق تعريض هذا الطين للأشعة فوق البنفسجية تماماً كما حدث للعينات الصخرية حيث سيعطي الطين ذلك الوهج المميز (فلورسنت)، أما الغاز فيمكن اكتشافه بنفخ الهواء عبر سائل الحفر ثم بجعله يمر عبر كاشف الغاز حيث يحترق أي غاز سريع الالتهاب بمجرد ملامسته شعيرة من البلاتين في الجهاز تسخن بالكهرباء فينجم عن احتراقه ارتفاع في درجة الحرارة مما يدل على وجود الغاز.



شكل ١٨-١: سجل الطين وما يتضمنه من البيانات الخاصة بمعدل اختراق مثقب الحفر وكذا الفتات الصخري وخصائصه والشواهد البترولية والتحليل الكروماتوجرافي للمكونات الغازية المختلفة.

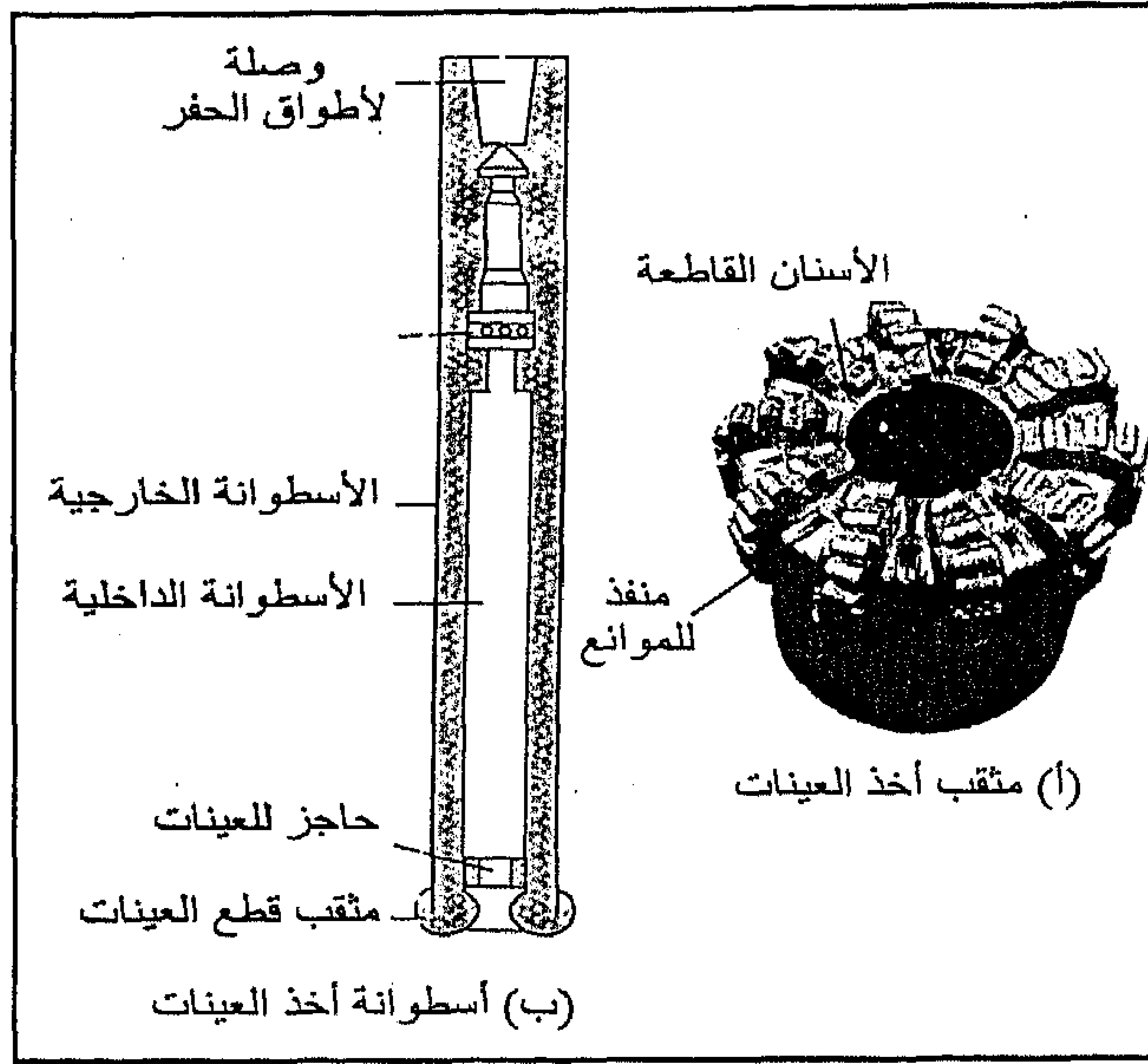
وحتى تصل الحُفارات الواردة من قعر البئر إلى السطح فإن ذلك سوف يتأخر لبعض الوقت والذي يعرف بزمن التأخر أو التخلف lag time ويمكن حساب هذا الزمن عن طريق إضافة بعض المقتفيات للأثر tracers مثل دفع كمية من حب القمح أو الأرز إلى داخل البئر والانتظار حتى عودتها إلى السطح وكم من الوقت استلزم ذلك بالنسبة لحجم البئر، وعلى نحو تقريبي فإنه في بئر قطرها ٢٠ سم (٨ بوصات) تستغرق دورة الطين نحو ١٠ دقائق لكل ٣٠٠ متر (١٠٠٠ قدم).

إن تسجيل خصائص التكوينات الجيولوجية بفحص طين الحفر والحُفارة عملية سهلة وغير مكلفة وتعطي نتائج سريعة لكن يبقي السؤال .. من أين جاءت هذه المواد؟؟ من قاع البئر أم تساقطت من طبقات عليا؟؟ لذلك تستخدم بصورة تكاد تكون قاطعة أساليب فحص إضافية لتأكيد المعلومات المستقاة من السائل والحُفارة.

العينات اللبية:

بالإضافة إلى المعلومات المستنبطة من طين الحفر والحُفارة المصاحبة قد يتطلب الأمر الحصول على المزيد من المعلومات بأخذ عينات صخرية من جوف تكوين جيولوجي

معين، والعينات المستخدمة أسطوانية الشكل ويطلق عليها العينات الأسطوانية أو اللبية core samples، ويتم الحصول عليها بأن يتوقف الحفر عند أعلى المسافة التي تقرر أخذ العينة منها وتسحب سلسلة أنابيب الحفر والمثقب ويستبدل هذا الأخير بمثقب آخر يعرف بمثقب أخذ العينات rotary coring bit (شكل ١٨-٢) وهو مصنوع من الصلب ومزود بأسنان من الماس أو التنجستين ومجوف بداخله وفي أعلاه توجد أسطوانة أخذ العينات core barrel وهي أسطوانة مزدوجة: الخارجية منها تدور مع دوران أنبوب الحفر والمثقب وتشارك في عملية القطع، أما الأسطوانة الداخلية فهي ثابتة ووظيفتها استقبال العينة الأسطوانية المقطوعة واحتجازها بداخلها بمساعدة ماسك وصمام خاص، وفي الفراغ الموجود بين الأسطوانتين يسري سائل الحفر ويتم دورته، وبعد الانتهاء من عملية أخذ العينة ترفع مجموعة الحفر إلى خارج البئر وتفكك أجزاؤها وتستخرج العينة الأسطوانية وتحفظ في صناديق معدة لهذا الغرض، كما يستبدل المثقب بمثقب الحفر السابق حيث يستأنف الحفر من جديد. وتجدر الإشارة إلى أن قطر العينة الأسطوانية يتراوح بين (٤٫٥-١٣٫٥ سم) (١٫٧٥-٥٫٢٥ بوصة) وطولها من ١٢٠ متراً (٤٠٠ قدم) ولكنه يتراوح في أغلب الأحوال ما بين ٦-٢٧٫٥ متر (٢٠-٩٠ قدماً). وليس هناك ضمان كاف أن تستخرج العينات الأسطوانية كوحدة كاملة، فقد تكون مهشمة بدرجة بالغة أو أن يكون ما أمكن استخراجه هو جزء فقط من المسافة المخططة، بل ربما يكون الجزء الأكبر قد جرفه سائل الحفر وهو أمر قد نصادفه في التكوينات الرملية الرخوة والسائبة، ثم إن معدل التقدم في الحفر هنا أبطأ مما هو أثناء الحفر العادي لضرورة سحب أنبوب الحفر بصورة أكثر تكراراً نظراً لأن أسطوانة أخذ العينات ذات طول محدد، لهذا فإن أخذ العينات الأسطوانية coring عملية مكلفة وغير مضمونة النتائج كما يصعب في الآبار الاستكشافية الأولى المخاطرة باتخاذ قرار القيام بهذه العملية حيث يكون موقع التكوينات الجوفية المهمة مازال غير محدد على وجه الدقة إلا بعد أن يكون قد تم تجاوز تلك التكوينات ويكون الوقت قد فات لأخذ العينات منها. كما أنه نظراً لعدم إمكانية الحصول على نتائج التحليل المعملي للعينات الأسطوانية فإن قرار استخراج هذه العينات يتطلب حرفية عالية سعياً وراء المعرفة وتوفيراً للوقت والجهد.

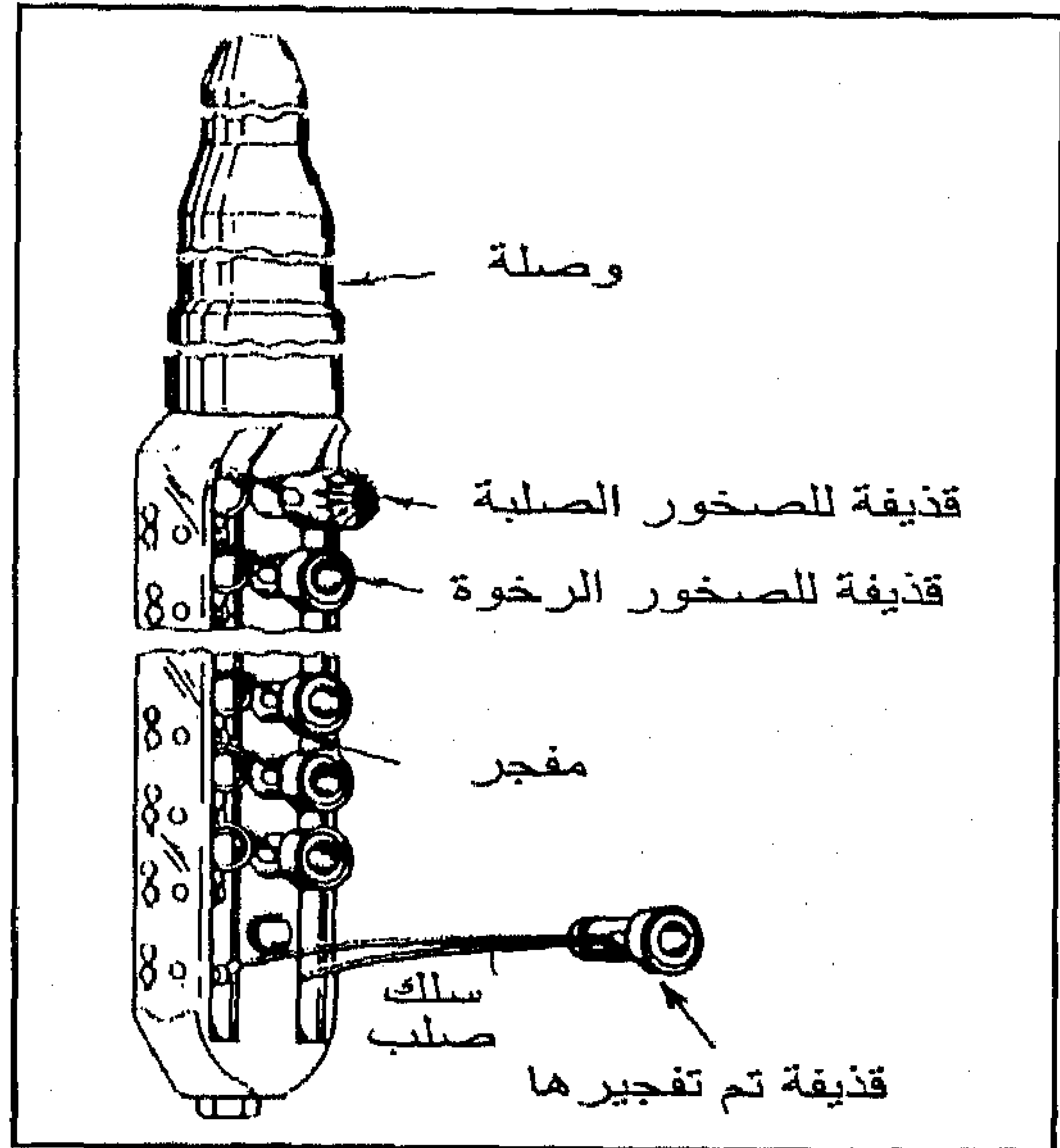


شكل ١٨-٢: مثقب وأسطوانة أخذ العينات الصخرية.

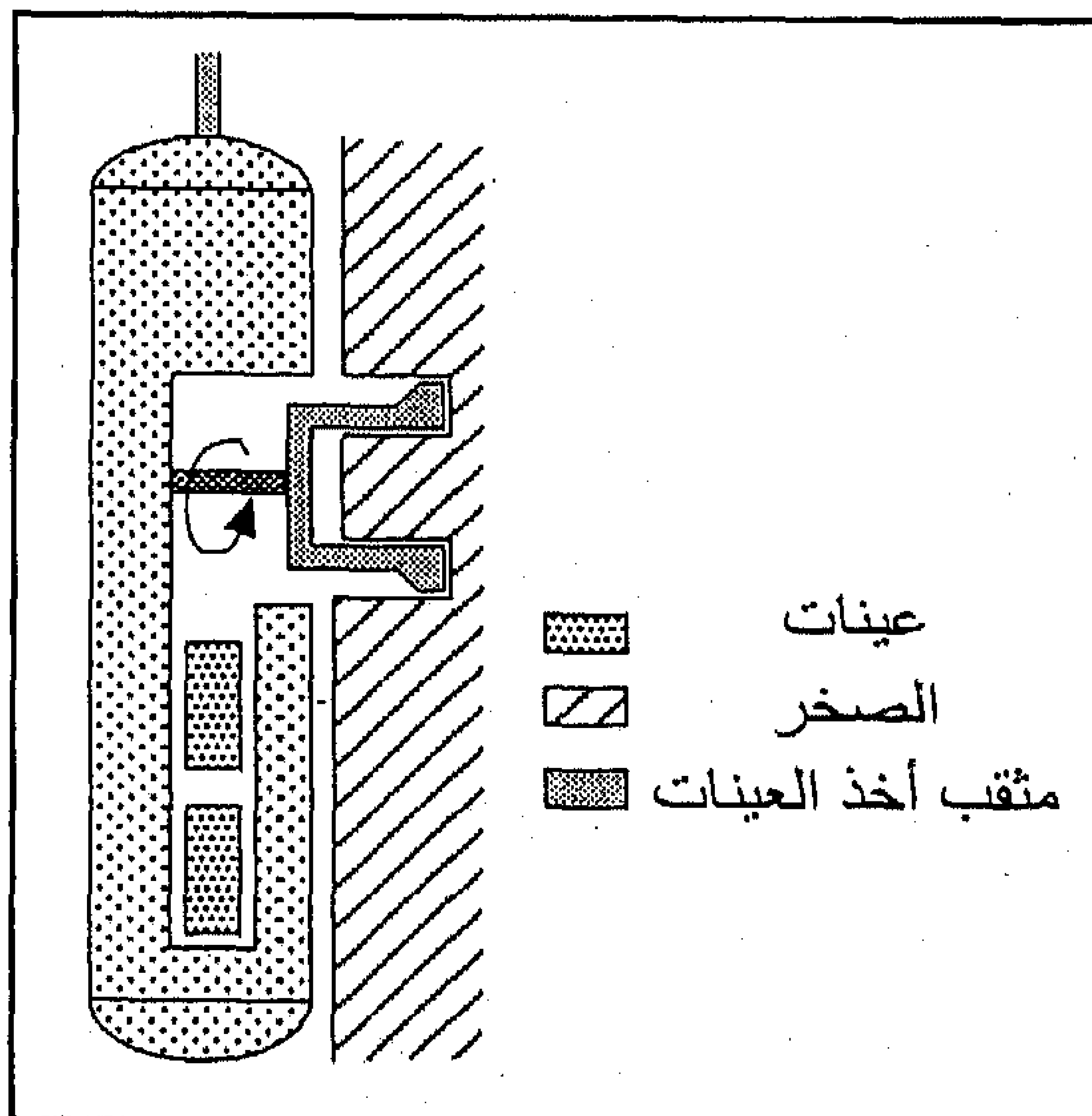
العينات الجانبية:

إذا تعذر أخذ العينات الجوفية ودعت الضرورة إلى الحصول على عينات جوفية فإنه يمكن إجراء ذلك بطريقة أخذ العينات الجانبية (sidewall cores (samples والتي بموجبها يمكن عند أي عمق مختار في البئر قبل تغليفها استخراج عينات جوفية صغيرة خلال الوقت الذي تكون فيه سلسلة أنابيب الحفر خارج البئر، ويتم ذلك بإطلاق عدة أسطوانات صغيرة ومجوفة (٢٠-٣٠ أسطوانة) في جوانب البئر بواسطة شحنات من المتفجرات من فتحات المدفع gun، وتفجر الشحنات بواسطة تيار كهربائي منقول عبر كبل موصل ينزل عليه المدفع، وتربط الأسطوانة بالمدفع بأسلاك صلبة (شكل ١٨-٣)، وبعد عملية الصدم precussion تسحب الأسطوانات والمدفع بواسطة الكبل إلى الخارج بعد أن تكون الأسطوانات قد نجحت في مهمتها واستخلصت العينات الصخرية plugs من جانب البئر، غير أن هذه العينات غالباً ما تكون صغيرة ومتفتتة (٢ سم في القطر و٥ سم في الطول وأقل من ذلك على الأغلب) وملوثة بطين الحفر إلى حد كبير، وبالإضافة إلى ذلك فإن خصائص الصخور كالمسامية والنفاذية تكون قد تغيرت بفعل طلقة bullet أخذ العينات ، لذلك فإن فائدة هذه العينات تنحصر بصورة رئيسة في تحديد عمر التكوينات وخصائصها الليثولوجية وما إذا كان الزيت موجوداً أو غير موجود.

وبالاضافة إلى طريقة أخذ العينات بالطلقات استحدث مؤخراً جهاز سلكي يعمل بالحفر بدلا من الصدم وذلك باستخدام مثقب صغير يقوم بالحفر drilling داخل جدار البئر عند النقطة المحددة (شكل ١٨-٤)، وبعد الانتهاء من استخلاص العينة والتي تكون عادة في حالة جيدة فإنها تسقط في حيز مخصص لهذا الغرض داخل الجهاز ويستوعب عدداً من العينات يتم الفصل بينها بطريقة معينة ، ويمكن تحريك الجهاز بعد ذلك إلى نقطة أخرى وهكذا، وما يعيب الجهاز الجديد هو أن حجم العينات المستخرجة صغير للغاية حيث يبلغ قطر العينة بوصة واحدة (٢،٥ سم) وطولها ١،٧٥ بوصة (٤،٥ سم).



شكل ١٨-٣: موقع أخذ العينات الجانبية.



شكل ١٨-٤ : أخذ العينات عن طريق الحفر داخل البئر.

سجل زمن الحفر:

يدون هذا السجل معدل اختراق مثقب الحفر rate of penetration (ROP) للصخور أثناء حفرها ويقدر هذا المعدل بالدقائق لكل متر أو قدم من تلك الصخور، ويجري ذلك على لوحة بيانية تدور على أسطوانة تسمى مسجل الحفر geolograph وموجود على أرضية جهاز الحفر، ويتوقف معدل الاختراق على بارمترات الحفر وخصائص الصخور، وتشمل البارمترات عدد لفات المثقب في الدقيقة والوزن على المثقب ونوع المثقب، وبافتراض أن هذه جميعها ثابتة نسبياً فإن العامل الرئيس يكون محصوراً في الخصائص الصخرية، وفي حالة استخدام المثاقب ثلاثية المخاريط فإن صخور الحجر الرملي تتميز بمعدلات اختراق عالية يليها الطفل فصخور الحجر الجيري ذات المعدلات الأبطأ.

واذا ما كان هناك تغير مفاجئ في معدل الحفر يقال له فاصل الحفر drilling break، وهو يحدث عندما يخترق المثقب سطح طبقة جديدة مما يجعل من هذه الفواصل أدلة استرشادية في التعرف على حدود الطبقات المختلفة، كذلك فإنه يمكن أيضاً التمييز بين الأجزاء الرخوة (المسامية) وتلك الكثيفة داخل الخزان الواحد، وهو من الأمور المشاهدة عادة في الصخور الكربوناتية (راجع شكل ١٨-١).

سجل الطين:

يعتبر سجل الطين mud log واحداً من أهم مصادر المعلومات التي يسعى إليها الباحثون للحصول عليها لتقييم التكوينات التحتسطحية حتى ولو بصورة نوعية qualitative، وسجل الطين هو تحليل كيميائي لطين الحفر والحُفارات الواردة إلى السطح والتعرف على ما قد يكون بها من آثار للبترول أو الغاز، وتقوم بهذا العمل إحدى شركات الخدمة من داخل مقطورة خاصة logging trailer مقامة عند موقع الحفر، وبين الحين والحين تؤخذ عينات من سائل الحفر والحُفارات إثر وصولها إلى سطح البئر وتحليلها كيميائياً. وكغيره من السجلات البئرية يتمثل سجل الطين بشريط من الورق له رأس مدون عليها اسم المشغل واسم البئر وموقعها وغيرها من بيانات، أما بقية الشريط فهي تمثل العمق وما يقابله من بيانات خاصة تتعلق أساساً بكميات الغاز والزيت التي استدل عليها

من طين الحفر، ويعرف الغاز المستدل عليه بقطعية الغاز gas-cut والزيت بقطعية الزيت oil-cut، أما إذا ما وجد زيت أو غاز في مستوى أعلى من الخلفية المعتادة فيكون ذلك علامة أو دلالة show على وجود الهيدروكربون في صورة تدعو للاهتمام، كما أن التحليل الكيميائي المفصل يمكن أن يوضح النسب المختلفة للمكونات الرئيسة مثل نسبة غاز الميثان (C_1) والإيثان (C_2) والبروبان (C_3) والبيوتان (C_4) والبنتان (C_5) وهي تختلف من الزيت إلى الغاز، وبالتالي يمكن تحديد ما إذا كان الهيدروكربون يتكون من الغاز أو الزيت أو الاثنين معاً (راجع شكل ١٨-١)، ويبين هذا الشكل في مجمله مثالاً لسجل الطين في إحدى الآبار حيث يعطي معلومات عن معدل الاختراق والدلالات الهيدروكربونية ووصفاً ليثولوجياً للطبقات وكذلك بقع الزيت بالعينات المستخرجة وقراءات عالية من خلال كاشف الغاز والتي تكشف عن وجود المكونات الثقيلة في الغاز الصاعد، وهو مثال يوضح قيمة سجل الطين في إمكانية الجمع بين المعلومات الواردة من مصادر مختلفة.

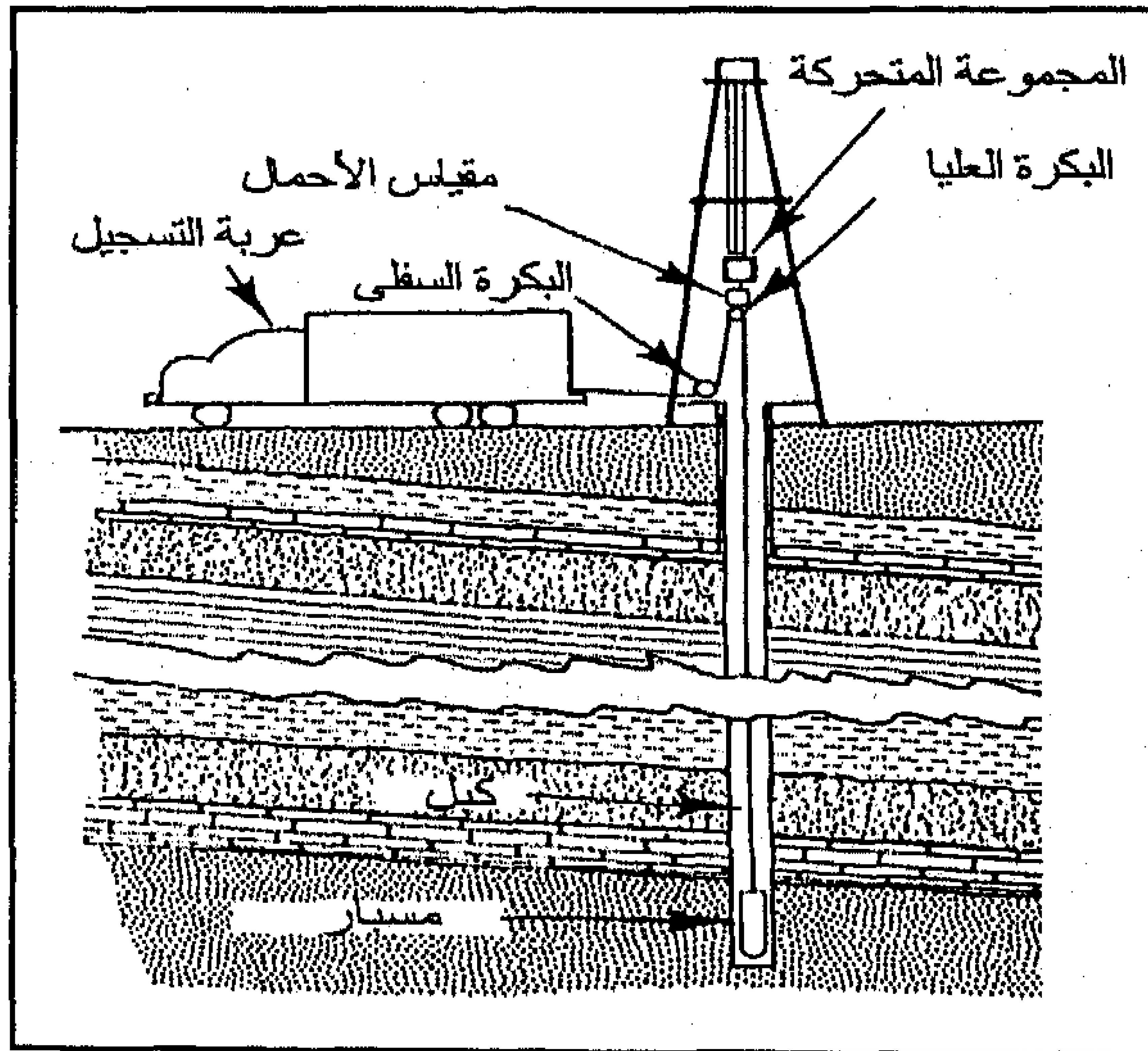
ونظراً لأن سجل الطين يقدم معلومات نوعية ولا يعطي تقييماً كمياً quantitative للتكوينات التحتسطحية كان لابد من الاستعانة بمصادر أخرى تحقق هذا الهدف وهو ما سوف نتناوله فيما يلي.

تسجيلات الآبار:

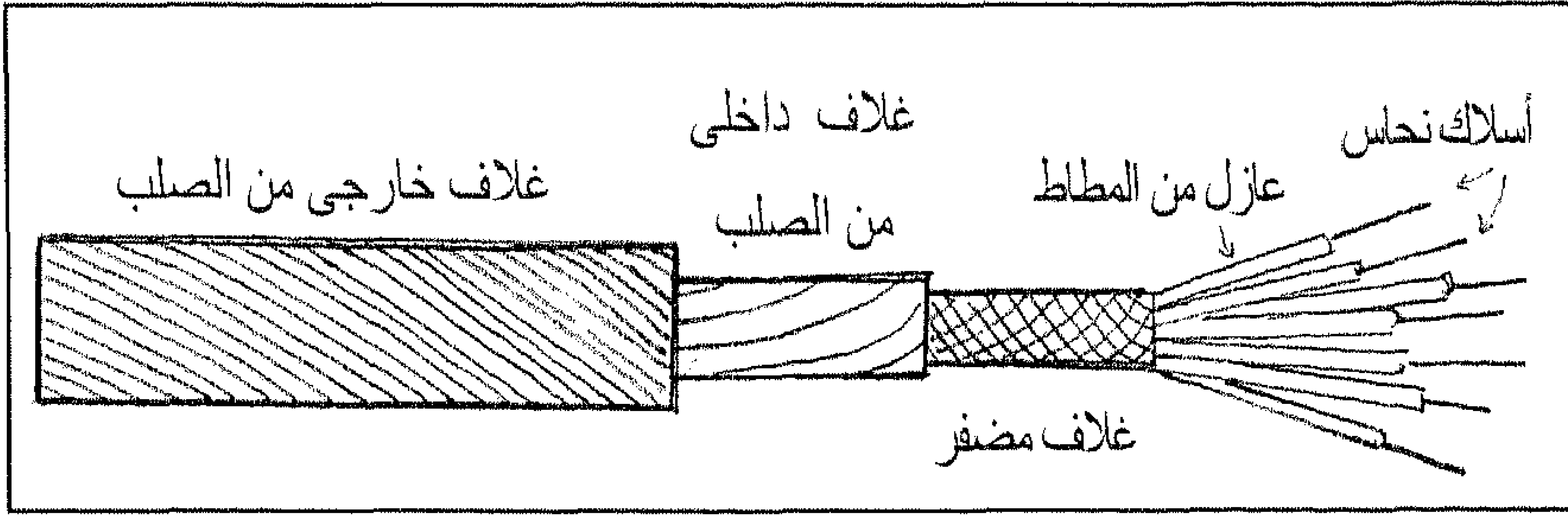
تشكل تسجيلات الآبار well logs أو كما يطلق عليها أيضاً التسجيلات السلكية wireline logs مصدراً رئيساً للحصول على المعلومات التي يستخدمها الجيولوجيون والمهندسون في تقييم التكوينات الصخرية والخزانات الجوفية من الناحيتين النوعية والكمية، ولا تخلو بئر قد حفرت من إجراء مجموعة التسجيلات بها، فقد أصبح هذا الأمر روتينياً ومنهجياً نظراً لما تقدمه هذه التقنية من فائدة كبيرة في التعرف على جودة وكفاءة الخزانات الجوفية والهيدروكربونات والصخور المصدرية وأيضاً حساب التقدير الحجمي للمخزون البترولي والنمذجة الجيولوجية أثناء تقييم وتنمية الحقول وفيما يتعلق أيضاً بالهيدروكربونات المتبقية بالخزان الجوفي أثناء عملية الإنتاج، كما أن تكلفة التسجيلات عادة ما تتراوح ما بين ١٠-١٢٪ من إجمالي تكلفة البئر وقد تقل بعض الشيء في الآبار الإنمائية.

وسجل البئر هو قياس للخصائص الفيزيائية للصخور التي اخترقتها البئر أثناء حفرها وتشمل هذه الخصائص المقاومة النوعية الكهربائية والإشعاعية وسرعة الموجات

الصوتية والكثافة والمسامية وغيرها، وذلك بواسطة جهاز (مسبار) sonde (شكل ١٨-٥أ) يدلى داخل البئر وهو أسطواني الشكل ويبلغ طوله ما بين (٨-١٩ متراً) (٢٧-٦٠ قدماً) وقد يصل أحياناً إلى نحو ٢٧٫٥ متر (٩٠ قدماً) وقطره ما بين (٨-١٠ سم)(٣-٤ بوصات)، ويختلف الجهاز بحسب الخاصية الفيزيائية المراد قياسها، كما يتصل هذا الجهاز بكبل كهربائي cable متعدد الموصلات ومدعم بغلاف من الصلب المتين (شكل ١٨-٥ب) لكي يتحمل الضغوط ودرجات الحرارة العالية السائدة في قاع البئر، ويدار الكبل هبوطاً وصعوداً حول أسطوانة drum تقع بالجزء الخلفي من شاحنة التسجيل logging truck (شكل ١٨-٦) ويلف عليها بعد الانتهاء من عملية القياس، ويتصل الكبل أيضاً بوحدة التسجيل recording unit للبيانات الواردة اليها من البئر إلى السطح، وفي حالة إجراء العملية على الأرض تكون وحدة التسجيل داخل شاحنة truck، أما إذا كان القياس في البحر فتكون هذه الوحدة داخل مقصورة أو كابينة cabin مُركبة على منصة الحفر، وخلال عملية القياس يقوم المسبار بإرسال إشارات كهربائية تعكس مدى استجابته لخصائص التكوينات التي مر بها والتي ينقلها الكبل بدوره إلى وحدة التسجيل على السطح حيث تسجل على هيئة فيلم حساس أو شريط مغناطيسي أو على هيئة بيانات رقمية digital، وفي وحدات التسجيل الحديثة يمكن نقل البيانات الواردة بواسطة الأقمار الاصطناعية satellites في زمن حقيقي دون أي تأخير إلى المراكز الرئيسة حيث يمكن اتخاذ القرار المناسب للخطوة التالية.

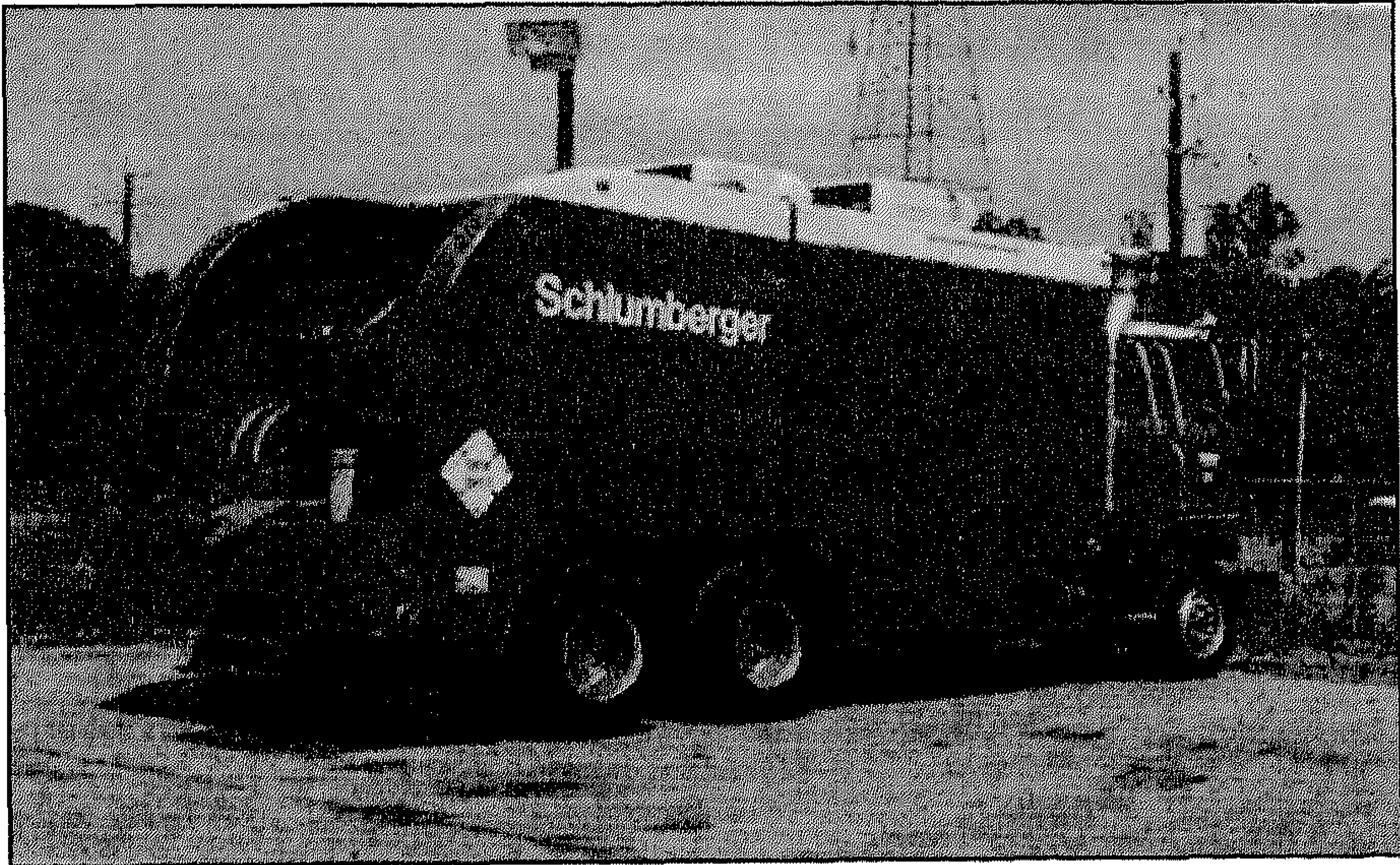


شكل ١٨-٥أ: رسم تخطيطي لوحدة التسجيل الكهربائي داخل البئر.

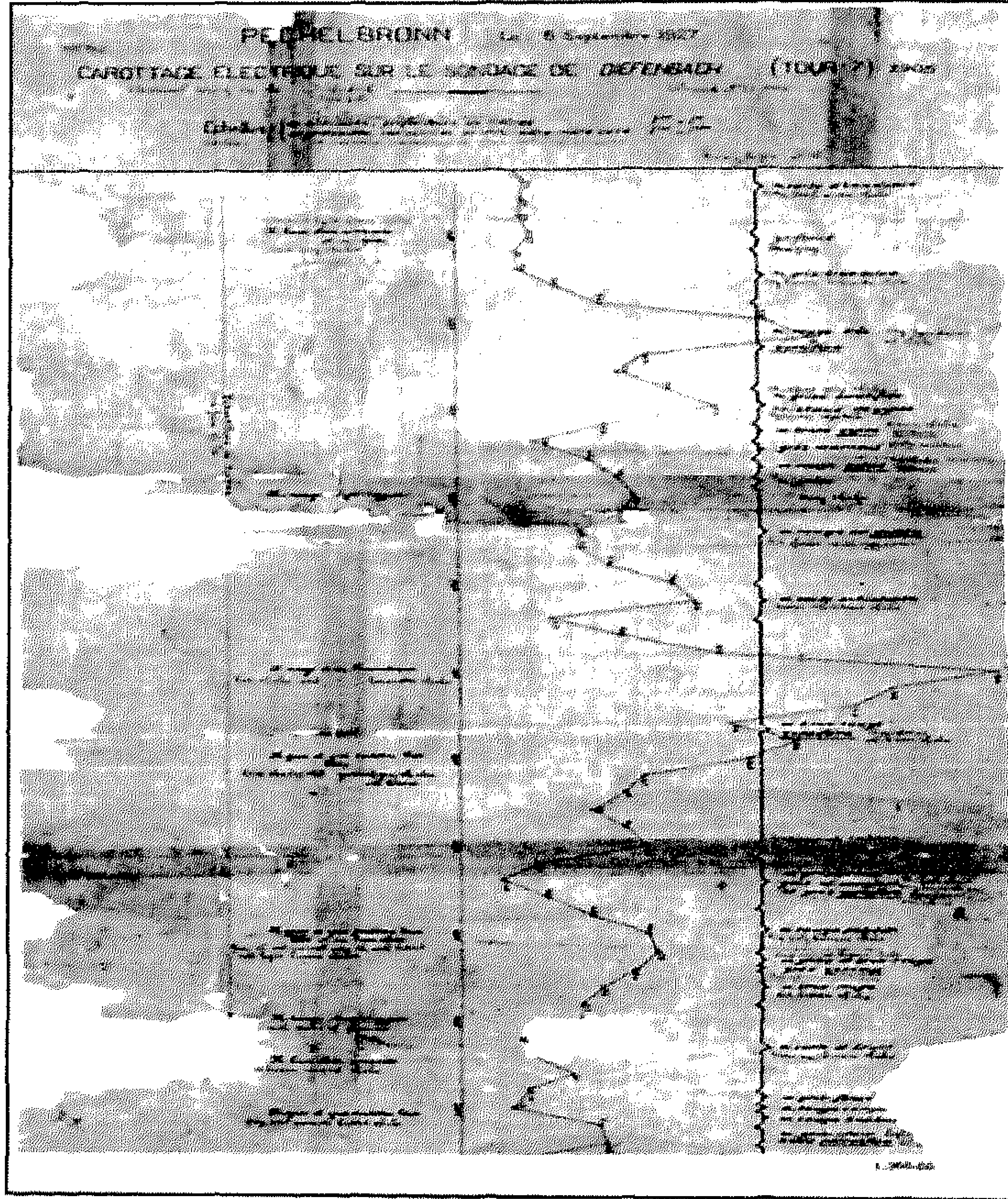


شكل ١٨-٥ب: مكونات كبل التسجيل الكهربائي.

وترجع البداية في استخدام تسجيلات الآبار إلى أواسط العشرينيات من القرن الماضي حيث تم أول تسجيل بالمقاومة الكهربائية في حقل بشلبرون Pechelbronn بفرنسا عام ١٩٢٧ وكان القياس يتم نقطة بنقطة ثم توقع النقاط على شريط ورقي وتوصل فيما بينها يدوياً (شكل ١٨-٧)، وبالطبع فهذا لا يحدث الآن فالسجل متواصل من قعر البئر إلى السطح بطريقة آلية وبدرجة عالية من الدقة، كما أنه يمكن تسجيل أكثر من خاصية فيزيائية خلال رحلة واحدة بعد أن كان التسجيل يتم بصورة فردية لخاصية واحدة مما كان يتطلب وقتاً طويلاً يدخل في حساب تكلفة البئر، وفي الوقت الحاضر ربما استغرقت عملية التسجيل عدة ساعات وربما عدة أيام وذلك حسب البرنامج المخطط لها وحسب الظروف البئرية السائدة.



شكل ١٨-٦: مشهد خارجي لشاحنة التسجيل الكهربائي
وترى أسطوانة الكبل في المؤخرة.



شكل ١٨-٧: صورة أرشيفية لأول تسجيل داخل البئر ورسمه يدوياً في حقل بشلبرون بفرنسا عام ١٩٢٧. لاحظ التباينات في قراءات المقاومة الكهربائية تبعاً لليثولوجية الصخور.

وبجانب النسخ المسجلة على الحاسوب (الكمبيوتر) هناك طبعات ورقية من التسجيلات المختلفة على هيئة شريط من الورق له شكل محدد وذي محورين: المحور الرأسي ويمثل العمق والمحور الأفقي ويمثل الخاصية الفيزيائية التي تم تسجيلها، ولكل سجل رأس header مدون عليها البيانات الأساسية الخاصة بالبئر مثل نوع الخاصية المسجلة وموقع البئر وإحداثياتها والشركة صاحبة الامتياز وتلك التي قامت بالتسجيل والمهندس القائم بعملية التسجيل والمراقب وبعض مواصفات طين الحفر وراشح الطين وكذا عمق التسجيل بالنسبة لعمود الحفر المضلع (KB) أو الطاولة الرحوية (RT) أو بالنسبة لسطح الأرض (GL) كما هو موضح بشكل ١٨-٨.

REMARKS

Drilling Stopped 0700 / 29th ; Circulation Stopped 1100 / 29th ; Tool on Bottom 1430 / 29th ; 1st Run Service Order # 33955 ; B.H.T. 132 °F

RUN TWO 0600 18th ; 0800 18th ; 1300 18th ; 170

Stand Off — Inches	1.5	1.5
Cartridge No.	H 84	F
Panel No.	290	F160
Sonde No.	H 26	H447
IAP-D No.	107	D304
S&R	1	2

RUN ONE MUD SAMPLES:
Rm #1 = 1.35 @ 57°F
Rm #2 = 1.34 @ 60°F
Rm #3 = 1.37 @ 57°F
Rm AVG = 1.35 @ 58°F

RUN TWO MUD SAMPLES:
Rm #1 = 1.59 @ 62°F
Rm #2 = 1.45 @ 64°F
Rm #3 = 1.42 @ 64°F
Rm AVG = 1.46 @ 62°F

SPONTANEOUS-POTENTIAL millivolts — الجهد الذاتي — − 20 +

DEPTHS

CONDUCTIVITY millimhos/m = 1000 / ohms m²/m — الموصلية

INDUCTION — الأحاثة — 400 200 0 ; 600 400

المقاومة

RESISTIVITY ohms m²/m

16" NORMAL 0 50 ; 0 500

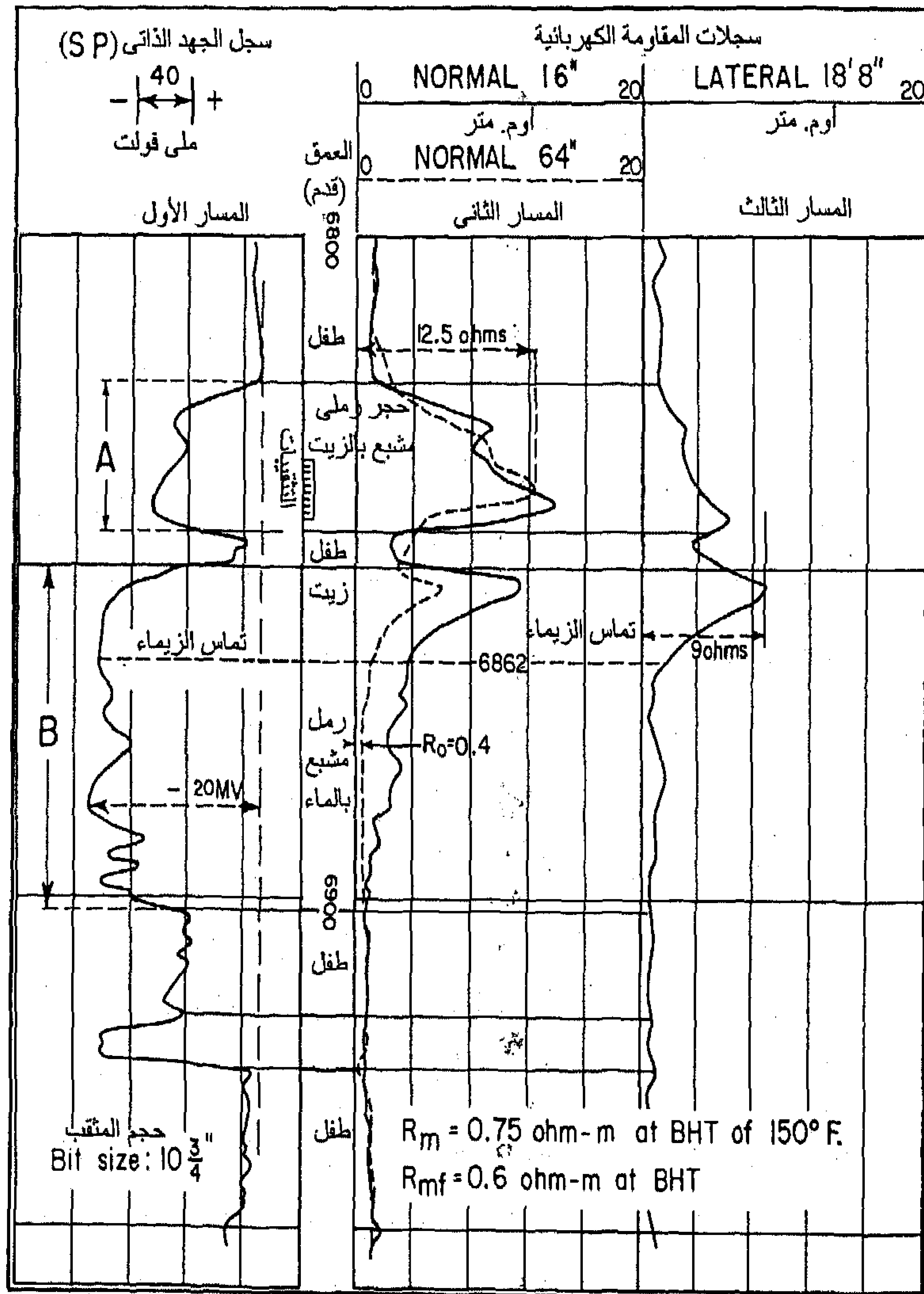
INDUCTION 0 50 ; 0 500

SCALE CHANGE @ 6083'

شكل ١٨-٨: صورة لرأس سجل البئر وعليه البيانات الرئيسية المطلوبة.

أما جسد الشريط فهو يتكون من مسارين (حارتين) أو ثلاثة tracks وتقع خانة العمق في وسط الشريط ويكون المسار الأول إلى أقصى اليسار والمسار الثاني إلى أقصى اليمين، ويتضمن كل مسار المنحنيات التي تمثل الخاصية المقاسة (شكل ١٨-٩)، وإذا ما

تضمن أكثر من خاصية فيمكن التمييز بينهما إما باستخدام اللون أو الخطوط والرموز المحددة. وفيما يتعلق بمقياس الرسم للخاصية المسجلة فعادة ما يكون مقياساً خطياً باستثناء حالات قليلة حيث يكون نصف لوغاريتمي أو لوغاريتمياً، أما مقياس العمق فهو خطي linear دائماً ويمثل بالمتر أو القدم، وهناك عادة مقياسان أو ثلاثة (١ : ٢٠٠) و(١ : ٥٠٠) و(١ : ١٠٠٠) ولأغراض المضاهاة correlation يكون مقياس (١ : ١٠٠٠) هو المفضل، أما المقياسان الآخران (١ : ٢٠٠) و(١ : ٥٠٠) فيستخدمان في الدراسات المفصلة detail للخزان الجوفي.



شكل ١٨-٩: مثال للتسجيلات البئرية في المسارات الثلاثة.

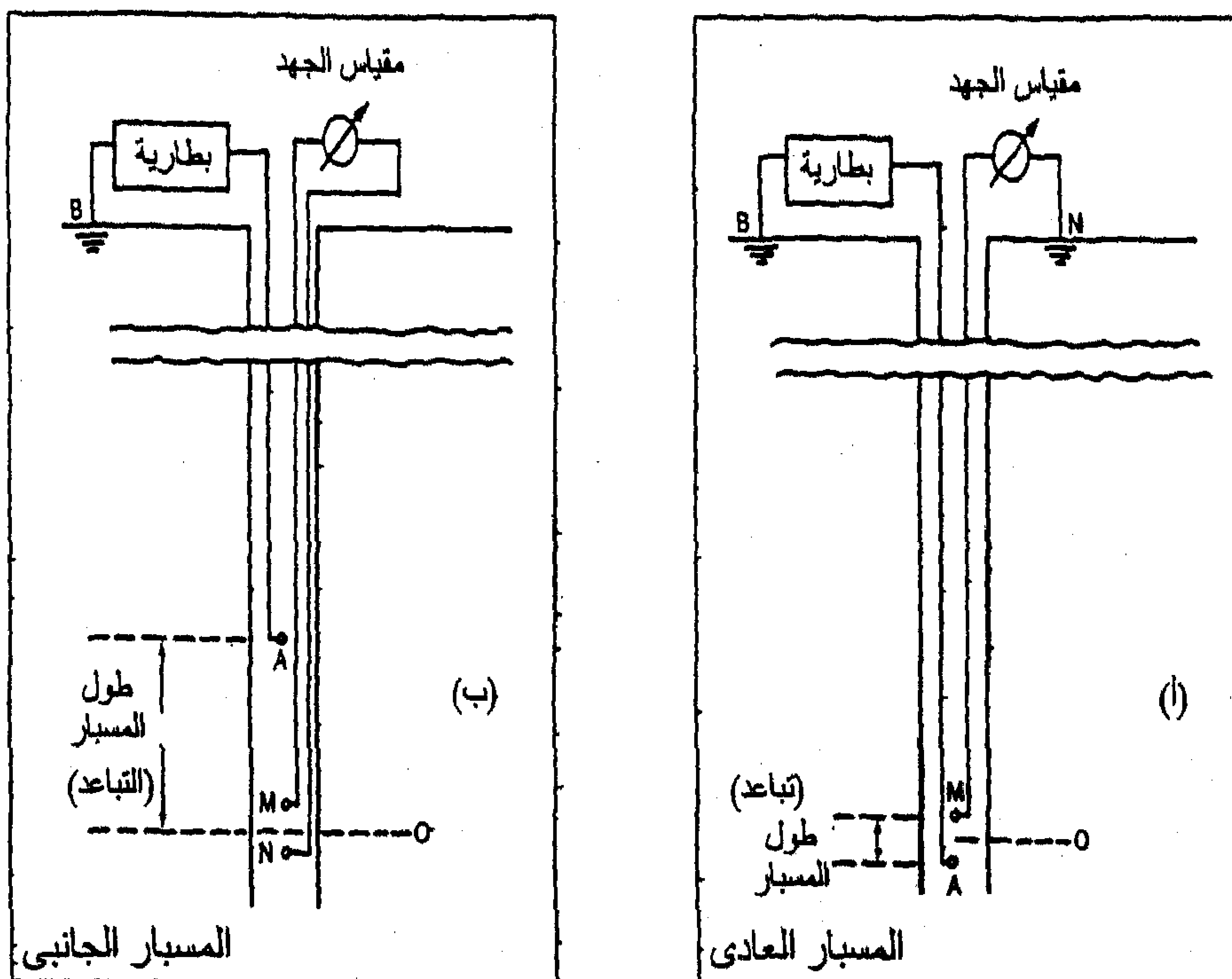
وتجري أغلب التسجيلات بعد الانتهاء مباشرة من حفر البئر وقبل تغليفها وتسمي تسجيلات الآبار غير المغلفة (غير المبطنة) open-hole logs، أما تلك التي تجري بعد تغليف البئر فتعرف بتسجيلات الآبار المغلفة cased-hole logs وهي الأقل شيوعاً مقارنة بالتسجيلات الأخرى، ويطلق مصطلح التسجيلات المعادَلة compensated logs على تلك القياسات التي تم انضباطها وتعديلها بسبب عدم الانتظام في قوام البئر وخشونة ورعونة جوانبها.

وعادة ما يتم تسجيل القياسات في مسارات ثابتة، حيث يتضمن المسار الأول (أقصى اليسار) منحنيات الجهد الذاتي وأشعة جاما وقطر البئر، أما منحنيات المقاومة الكهربائية والكثافة والنيوترون والصوت فيتم إظهارها على المسارين الثاني والثالث من السجل (راجع شكل ١٨-٨ و١٨-٩)، ونعرض فيما يلي شروحاً مختصرة لعدد من التسجيلات الشائعة الاستخدام والتي تساعد في تقييم التكوينات الجوفية وتحديد بارمتراتها البتروفيزيائية وعلى الأخص تلك المتعلقة بالسمك والليثولوجية والمسامية والتشبع بالهيدروكربون.

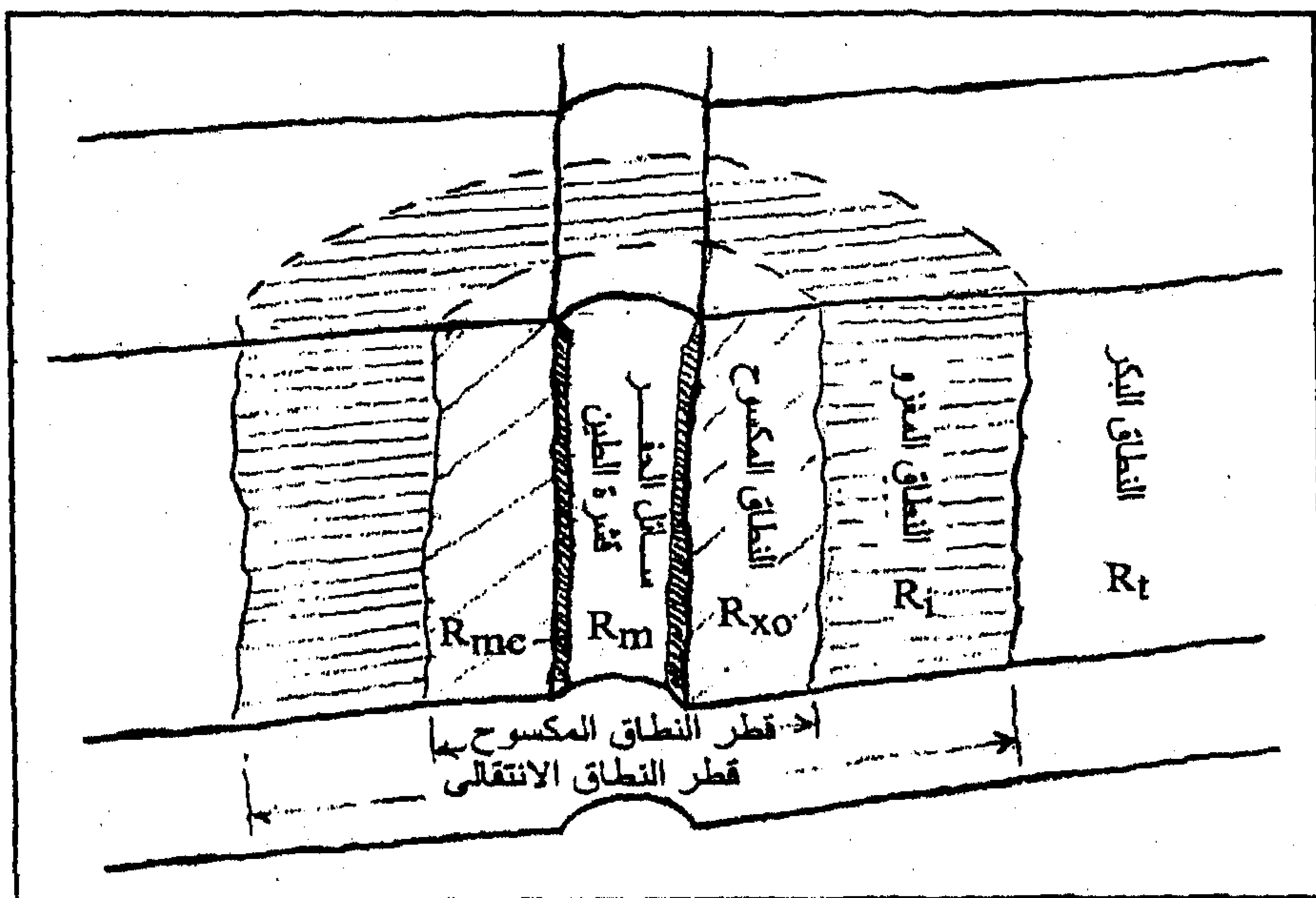
- **سجلات المقاومة الكهربائية:**

تقيس هذه السجلات المقاومة النوعية الكهربائية electrical resistivity للتكوينات الصخرية التحتسطحية، وهي أقدم تسجيلات استخدمت لهذا الغرض داخل الآبار بعد حفرها. وتقوم الطريقة على إدخال تيار كهربائي ذي شدة معينة (I) في البئر وبمعرفة الجهد (V) الناشئ يمكن إيجاد قيمة المقاومة الكهربائية (R) حسب قانون أوم $R = V/I$. وهناك نوعان من أجهزة القياس (المسابير sondes) وهما المسبار العادي القصير short normal resistivity device والمسبار العادي الطويل long normal resistivity device وتكون المسافة بين قطبي التيار والجهد في المسبار القصير ٤٠،٥ سم (١٦ بوصة) بينما هي في المسبار الطويل (١٦٢،٥ سم) (٦٤ بوصة) (شكل ١٨-١٠أ). ويتم تسجيل قراءات المسبار القصير على المسار الثاني بينما تسجل بيانات المسبار الطويل على المسار الثالث من السجل، ونظراً لأن المسبار الطويل يتمتع بمسافة (تباعد) spacing بين الأقطاب أطول من المسبار القصير فهذا يؤهله إلى تجاوز النطاق المغزو invaded zone الذي يحدثه راشح الطفل

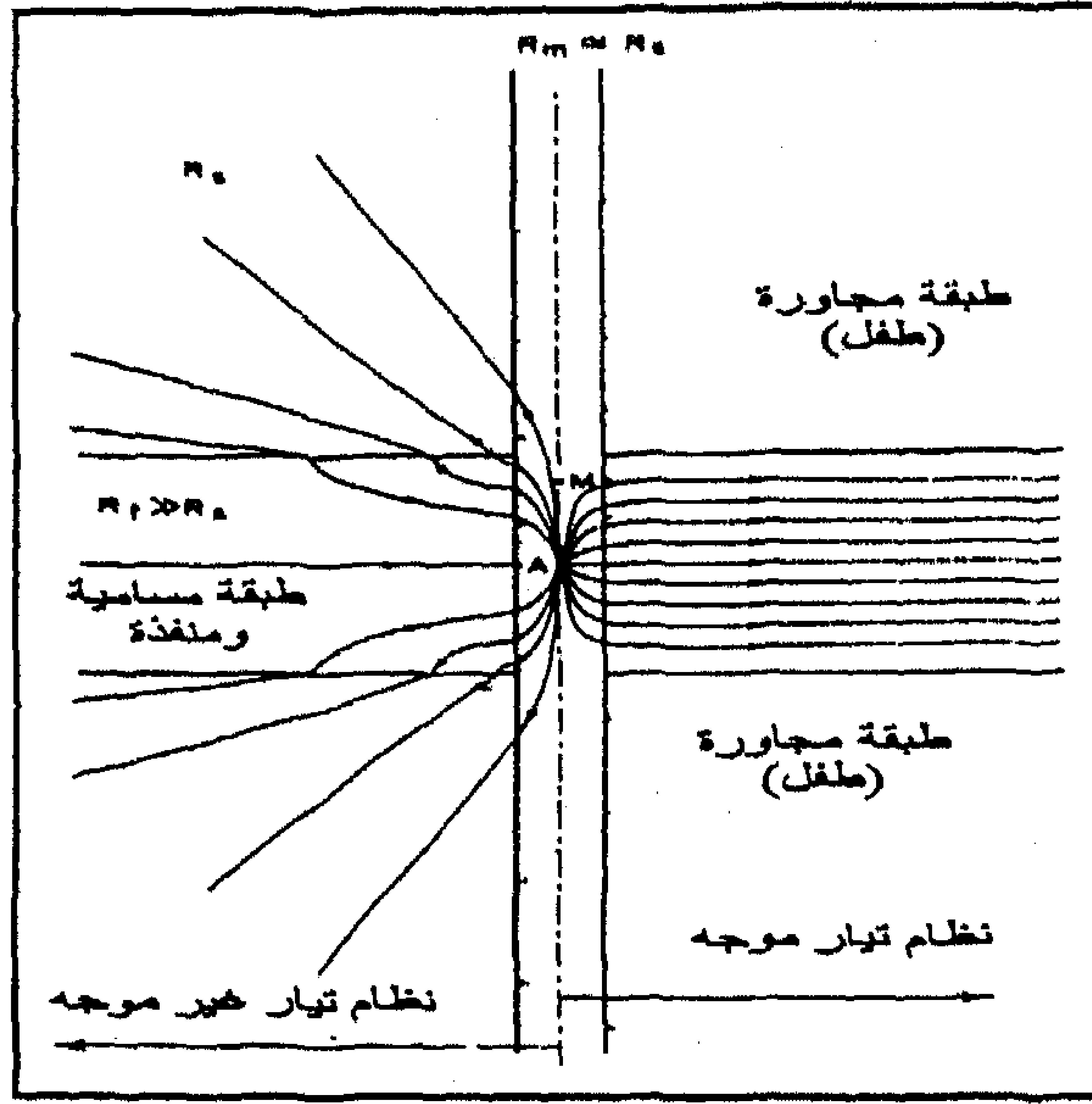
بغزوه داخل مسام الطبقات وامتداده داخلها أحياناً إلى نحو (٢٥٤ سم) (١٠٠ بوصة) شكل ١٨-١١، ونطاق الغزو له خصائص تختلف عن الخصائص الأصلية قبل الغزو ويكون في محتواه خليطاً من الموائع الأصلية وراشح الطين، وبالتالي فإن استجابة المسبار القصير تكون متأثرة بهذا النطاق وتصبح قراءات المقاومة الكهربائية ظاهرية وليست حقيقية مما يصعب معه تحديد نوع المائع الأصلي بالطبقة المسامية، أما المسبار الطويل وبسبب طول مسافته القطبية فإنه عادة ما يتجاوز حدود نطاق الغزو إلى داخل النطاق البكر virgin zone ليسجل قراءات أقرب إلى الحقيقة وبالتالي تحديد نوع المائع من بترول أو ماء. وعلى العموم فإن منحنيات المسبار القصير أو الطويل تتخذ أشكالا متماثلة (راجع الشكل ١٨-٩)، كما أنه أمام الطبقات العالية المقاومة (سواء كان ذلك راجعاً إلى وجود الهيدروكربون أو الماء العذب أو بسبب صلابتها الكبيرة) تكون قيم المقاومة المسجلة عالية بشكل واضح مقارنة بما فوقها أو تحتها من طبقات أخرى. ويجانب المسبار العادي هناك المسبار الجانبي lateral device (شكل ١٨-١٠ب) والذي يبلغ طول تباعده (A:0) حوالي ١٩ قدماً (٥،٧ متر) ويعطي منحنيات غير متماثلة للمقاومة الكهربائية (راجع شكل ١٨-٩) مما يصعب تفسيرها باستثناء بعض الحالات خاصة في الطبقات الرفيعة السمك وذات المقاومة العالية. وبالطبع فإن قيم المقاومة الكهربائية ليست كافية لتحديد مقدار تشبع الطبقة بالهيدروكربون حيث يلزم الأمر معرفة مسامية الطبقة ومقاومة ماء التكوين، كذلك فإنه أثناء إجراء القياس باستخدام هذا النوع من المسابير يتسرب جزء من التيار المرسل في جميع الاتجاهات إلى مسارات ذات مقاومات كهربائية ضعيفة مما يفقد معه جانب من شدة ذلك التيار وبالتالي لا يتحقق معه الحصول على قراءات حقيقية true للمقاومة الكهربائية، ومن ثم كان من الضروري استحداث أساليب جديدة للقياس وتوجيه التيار الكهربائي دون فقد جزء لا يستهان به من هذا التيار، وقد تجلى ذلك في استحداث مسابير ذات فاعلية عالية باستخدام تيار الحث الكهربائي induction logging أو تيار التحرز (التوقي) laterologs، guard logs والتي من شأنها تزويدنا بقراءات للمقاومة الكهربائية تقترب كثيراً من قيمتها الحقيقية بالإضافة إلى التعامل الجيد لهذه المسابير خاصة في تحديد الطبقات الرقيقة والمتوسطة السمك.



شكل ١٨-١٠: رسم تخطيطي لمسباري المقاومة الكهربائية.



شكل ١٨-١١: قطاع عرضي في بئر يوضح النطق المختلفة الناشئة عن غزو راشح الطين داخل الطبقة المسامية.



شكل ١٨-١٢: مقارنة بين سلوك خطوط تدفق التيار الكهربائي في النظامين الموجه وغير الموجه.

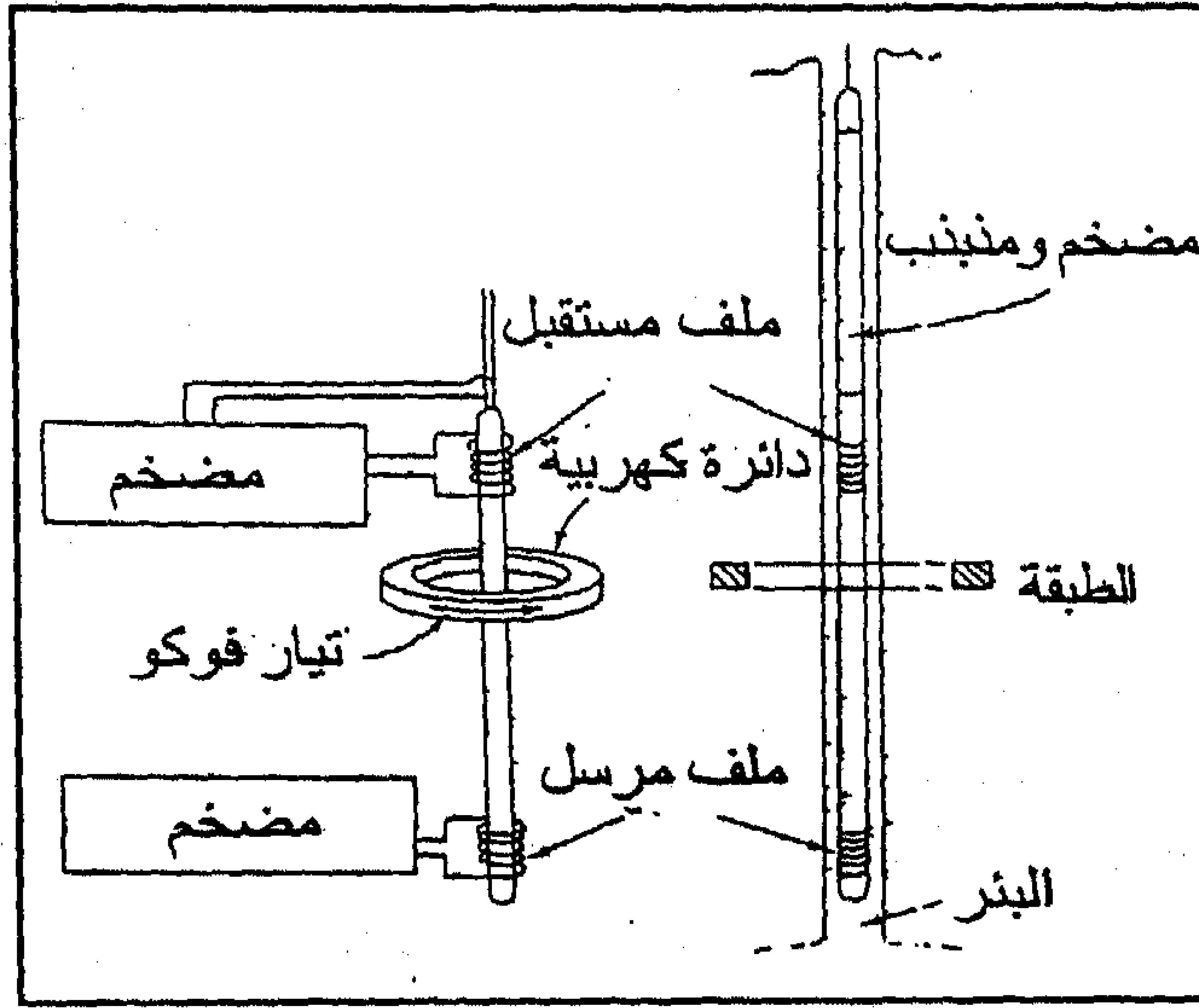
• مسابير التيار المُوَجَّه (الحث والتحرز):

بسبب عدم توفر تيار موجه للدفع به داخل التكوين الجوفي بالاضافة إلى بدء استخدام طين حفر ذي قاعدة زيتية في أواسط القرن الماضي بهدف تجنب إحداث أضرار للصخور الخزانية راجعة إلى غزو راشح طين الحفر مما يتعذر معه إجراء تسجيلات كهربائية باستخدام المسابير العادية (القصيرة والطويلة) كان لابد من إيجاد تقنية جديدة تعمل على توجيه التيار المرسل وتركيزه داخل الصخور ذات الاهتمام، وفي هذا الصدد يجري العمل باستخدام إحدى الطريقتين الآتيتين:

١) طريقة تيار الإحاثة:

يتكون المسبار المستخدم في طريقة تيار الإحاثة induction logging من عدة ملفات coils مثبتة على شياق خاص mandrel بعضها لإرسال التيارالكهربائي والأخرى receiver coils لاستقبال الإشارات الكهربائية المرتدة من التكوين التحتسطحي، وعلى أثر إدخال تيار متردد 20 KHz داخل الملفات المرسلة transmitter coils فإنه ينشأ عن ذلك مجالات كهرومغناطيسية في التكوينات المحيطة بالمسبار وهذه بدورها تحث تيارات دوامية داخل التكوين الجيولوجي تتناسب شدتها والموصلية الكهربائية electrical

conductivity (شكل ١٨-١٣) للتكوين والتي هي مقلوب المقاومة النوعية الكهربائية electrical resistivity، وعادة ما تكون المسافة بين ملفات الإرسال والاستقبال حوالي (١٠٠ سم)(٤٠ بوصة).



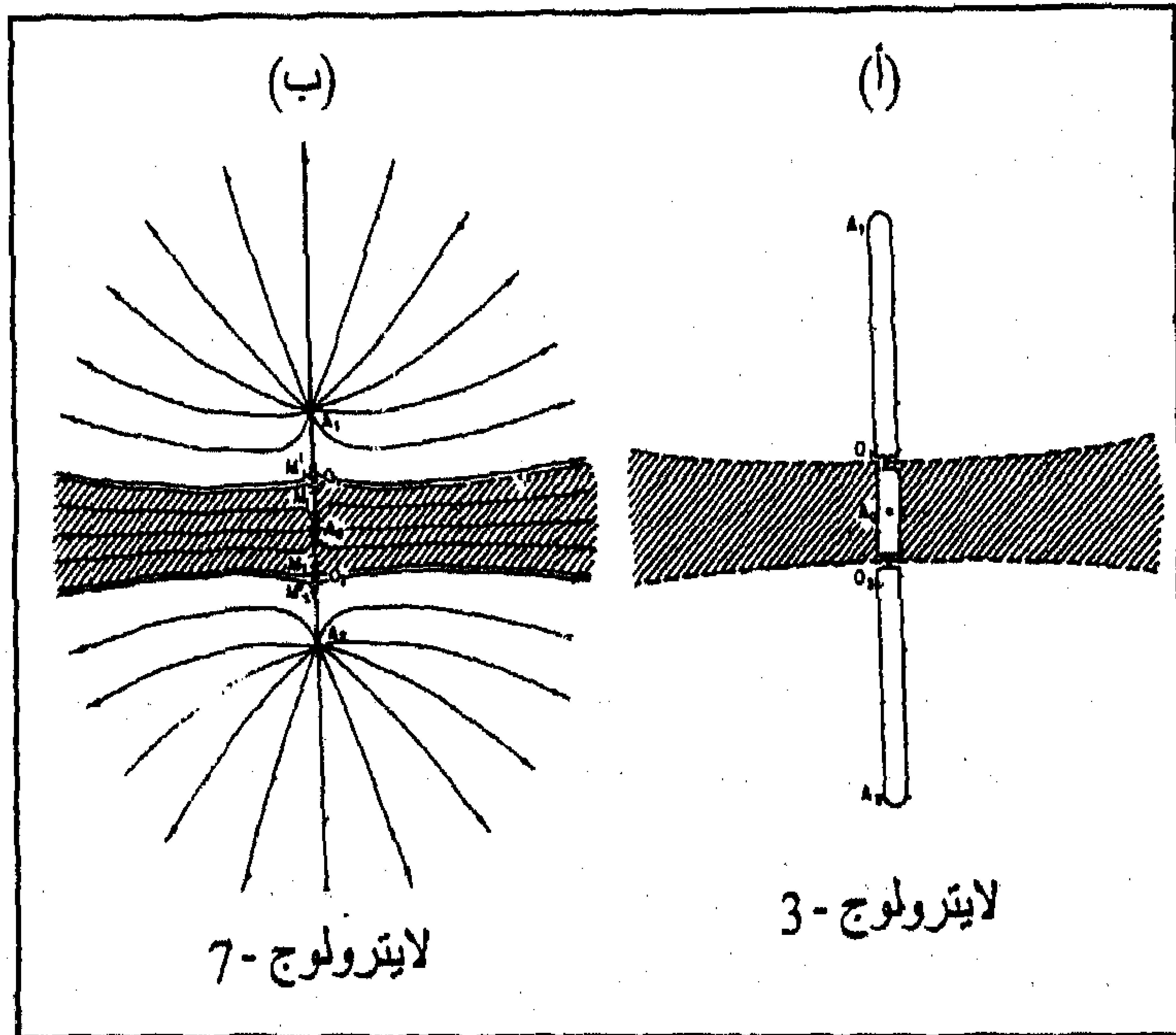
شكل ١٨-١٣: نظام مسبار تيار الإحاثة.

٢) طريقة التحرز أو التوقي:

تستخدم طريقة التحرز guard logs تياراً كهربائياً مسانداً عن طريق أقطاب معززة ومساندة للتيار الصادر من القطب الرئيس، ومن شأن هذا النظام إحداث تيار موجه قادر على اختراق التكوين الجوفي بشكل أفضل دون تأثير كبير للظروف البئرية، ومن ثم الحصول على قراءات للمقاومة الكهربائية المقاسة ذات وثوقية عالية.

ومن أمثلة هذه التقنية اللاتيرولوج ثلاثة laterolog-3، ويتكون هذا المسبار من ثلاثة أقطاب كهربائية: قطب مركزي A_0 وقطبين مساندين A_1،A_2 طول كل منهما (١٥٠ سم) (٥ أقدام) ويوجدان على مسافة قصيرة من القطب المركزي أعلاه وأسفله في نظام متماثل (شكل ١٨-١٤أ) ويرتبطان بدائرة كهربائية قصيرة، ومن القطب المركزي A_0 ينساب تيار كهربائي ذو جهد ثابت ومن القطبين A_1 وA_2 يمر تيار مساند يتم التحكم فيه أوتوماتيكياً بحيث تكون جميع الأقطاب واحدة الجهد، ومن ثم يكون مقدار التيار الصادر عن القطب المركزي في شكل لوح أفقي وبسمك (٣٠ سم) (١٢ بوصة) متناسباً مع المقاومة الكهربائية للتكوين المخترق.

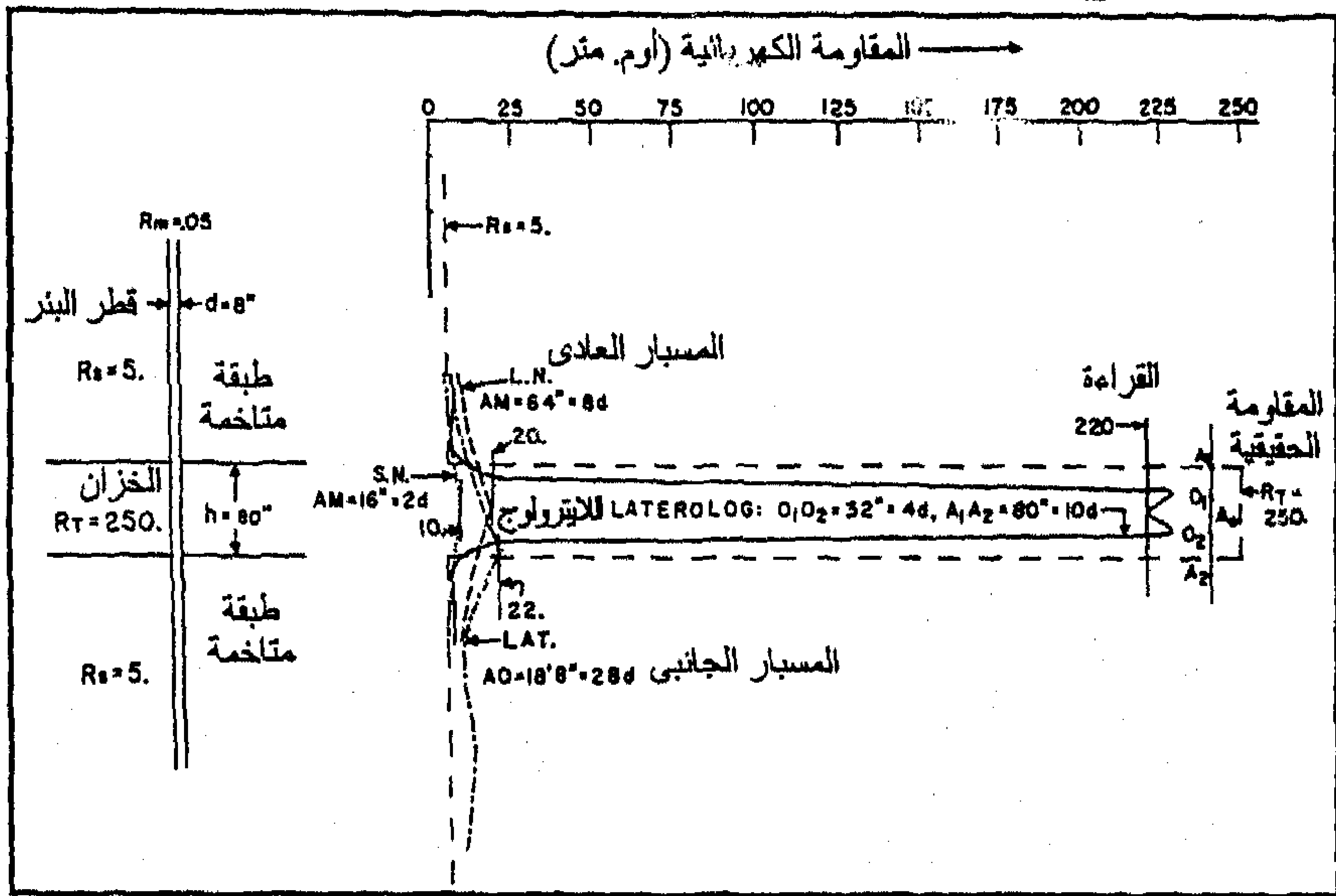
وبدلاً من الأقطاب الطويلة المساندة هناك نظام الأقطاب النقاطية point electrodes، ومن أمثلة هذا النظام مسبار اللاتيرولوج سبعة laterolog-7 والذي يتضمن سبعة أقطاب: قطب مركزي A_0 وثلاثة أزواج أخرى من أقطاب مساندة ومتابعة M_1 وM_2؛ M'_1 وM'_2؛ A_1 وA_2 وتوجد جميعها في نظام متماثل بالنسبة للقطب المركزي ومتصلة جميعها بدائرة كهربائية قصيرة وبطريقة مشابهة لما يحدث في اللاتيرولوج-٣ (شكل ١٨-١٤ب) ويكون مقدار التيار الصادر عن القطب المركزي في شكل لوح أفقي بسمك (٨٠ سم) (٣٢ بوصة)، أما الطول بين القطبين A_1 وA_2 فيكون (٢٠٠ سم) (٨٠ بوصة)، والشكل ١٨-١٥ يوضح مقارنة لاستجابة اللاتيرولوج-٧ أمام طبقة رقيقة مقارنة بتلك الصادرة من المسابير العادية، حيث يلاحظ مدى قدرة السجل الموجه على تحديد الطبقة وقراءة المقاومة الكهربائية لها بصورة جيدة للغاية.



شكل ١٨-١٤: نظام مسبار التيار الجانبي الموجه.

وبسبب النجاح الكبير الذي حققته مسابير التيار الموجه وتفوقها على المسابير التقليدية أدخلت تعديلات على أطوال القياس بها ليكون هناك المسبار العميق deep والمتوسط medium والضحل (الدقيق) (micro) shallow، وتبعاً لذلك فإنه يمكن قياس

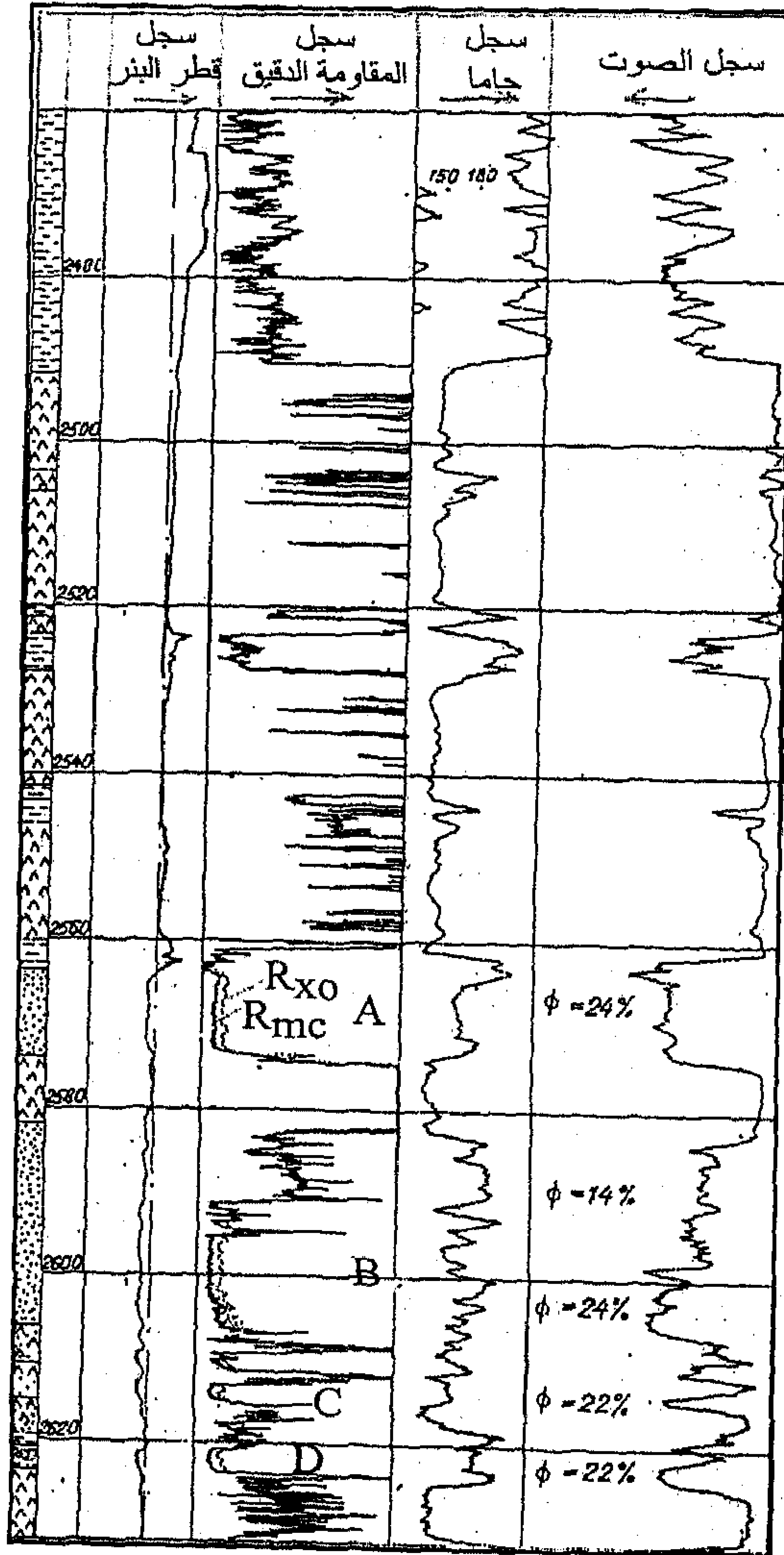
المقاومة (R_t) بداخل النطاق البكر uninvaded (virgin) zone والمقاومة (R_i) بنطاق الغزو invaded zone والمقاومة (R_{xo}) بالمنطقة المتاخمة لجدار البئر والمسماة بالنطاق المكسوح flushed zone (راجع الشكل ١٨-١١). وهناك الآن سجلات الحث المزدوجة dual induction and laterologs، كما توجد أيضاً مسابير لقياس المقاومة الكهربائية في النطاق المتاخم لجدار البئر (R_{xo}) منها المسبار الدقيق microlog والمسبار الجانبي الدقيق microlaterolog والجانبي المُوجَّه الدقيق microspherically focused (شكل ١٨-١٥). والمسبار الجواري proximity، ويمكن للقارئ الرجوع إلى المراجع ذات الصلة للمزيد من المعرفة والاطلاع.



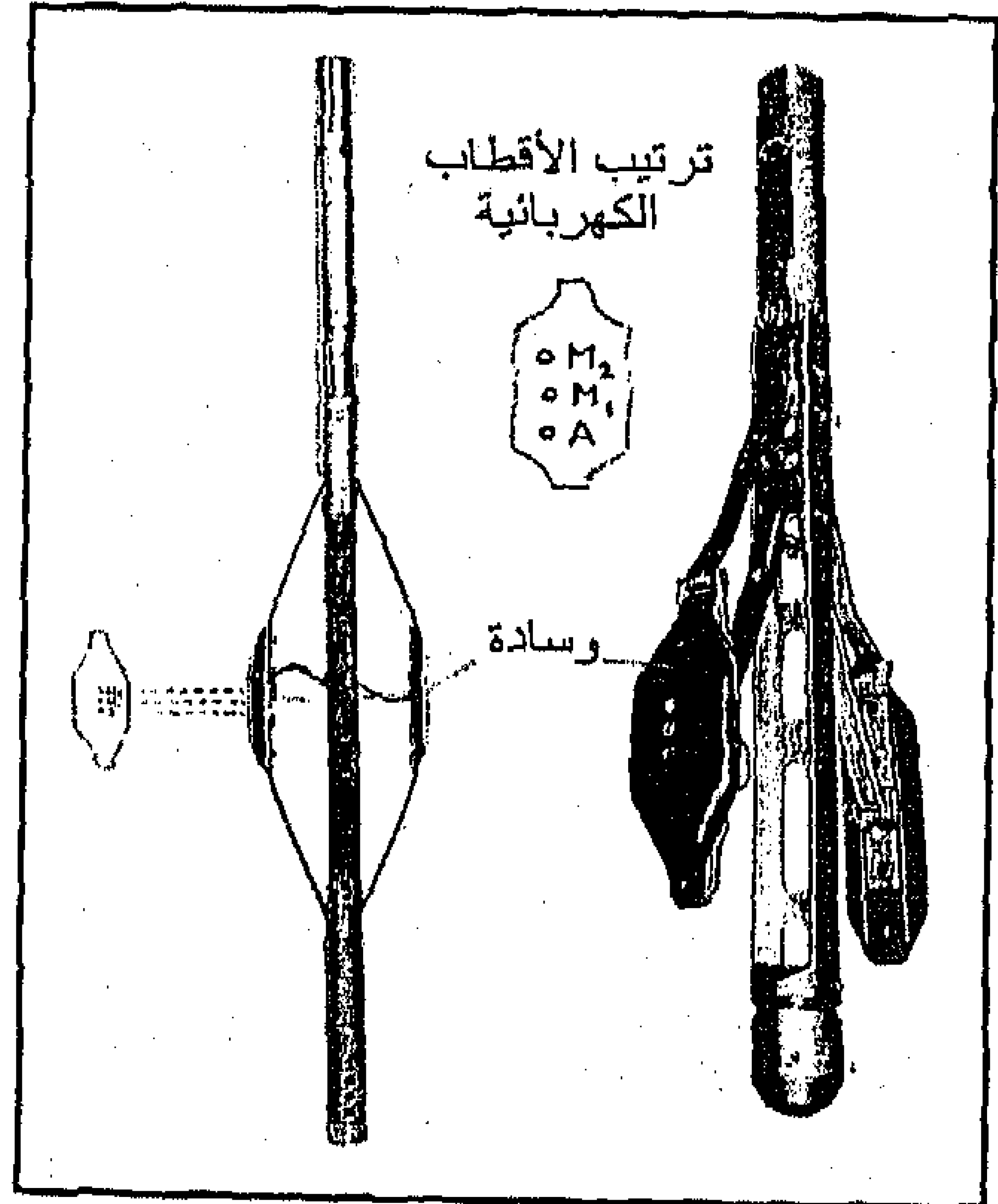
شكل ١٨-١٥: مقارنة لاستجابة اللايترولوج والمسابير العادية.

ونظراً لأهمية سجل المقاومة الكهربائية الدقيق microresistivity log (ML) من المفيد أن نقدم شرحاً مختصراً له. ويحتوى مسبار الميكرولوج (ML) على ثلاثة أقطاب كهربائية صغيرة(A, M_1, M_2) مثبتة على وسادة مطاطية تضمن الضغط على جدار البئر بواسطة سواعد خاصة تفتح وتقفل حسب الطلب (شكل ١٨-١٦)، وتتباعد المسافات بعضها عن بعض بمقدار ٠,٠٢٥ متر (بوصة واحدة)، ويسمح النظام بإجراء قياس بالمسبار المقلوب الدقيق microinverse ذي التباعد ١,٥ بوصة والمسبار العادي الدقيق micronormal ذي التباعد الأكبر نسبياً (٢ بوصة)، وبسبب هذا التباين في تباعد

الأقطاب يتأثر المسبار الأكبر بمقاومة النطاق المكسوح (R_{xo}) الذي يكون أعلى مقاومة من نطاق قشرة الطين (R_{mc}) في حالة وجود طبقة مسامية ومنفذة أمام نقطة القياس حيث يلاحظ وجود فارق أو انفصال separation في قراءات المسبارين (شكل ١٨-١٦)، الأمر الذي يمكن معه التعرف على الطبقات المنفذة وكذلك أسماكها وأيضاً تقدير مساميتها، ولا يحدث هذا الفارق في حالة الطبقات غير المنفذة حيث يتطابق المنحنيان عادة بسبب غياب راشح الحفر وبالتالي عدم تكون قشرة الطين هناك.



شكل ١٨-١٦ب: استجابة سجل المقاومة الدقيق والسجلات الأخرى أمام النطق الخزانية في بئر بخليج السويس



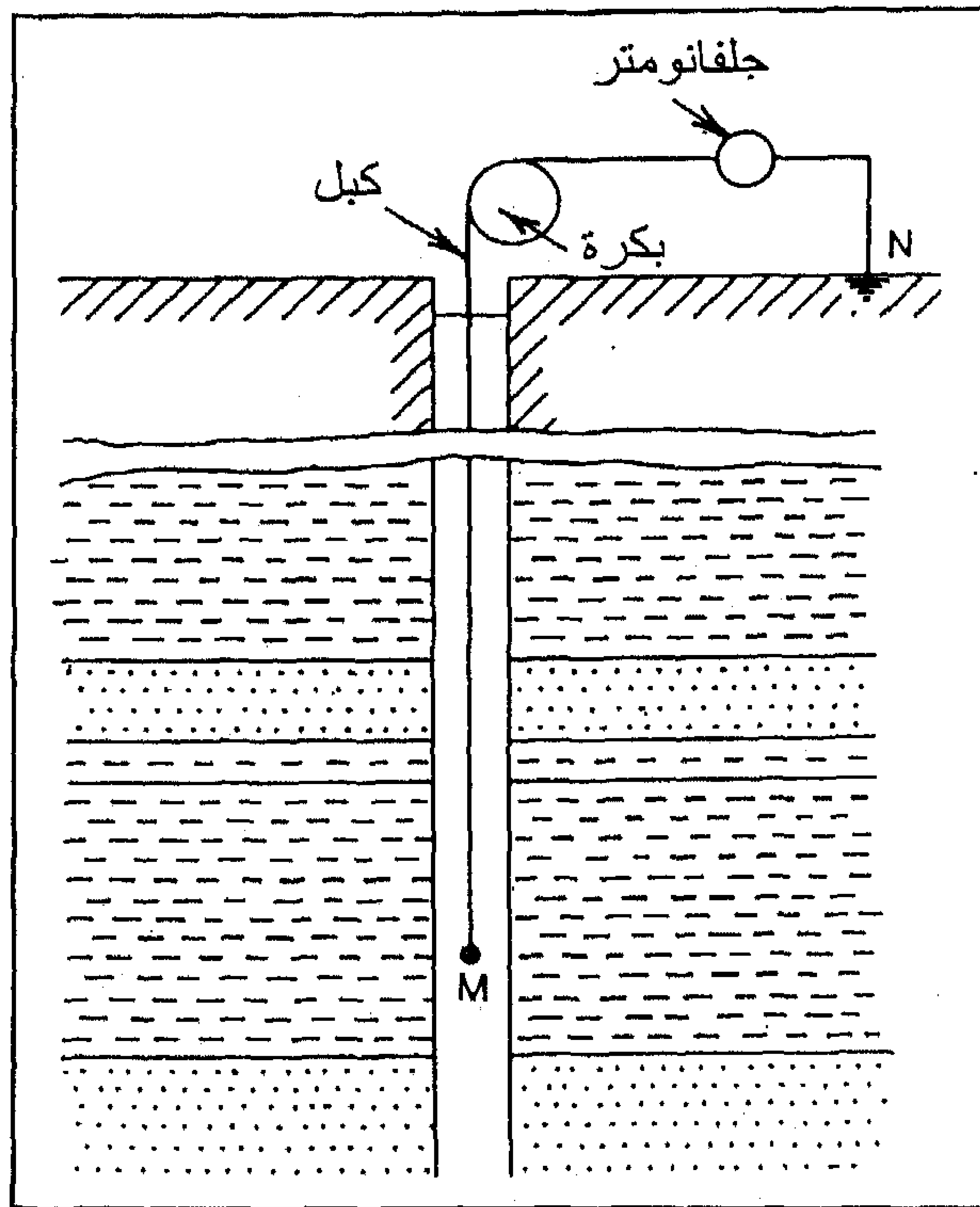
شكل ١٨-١٦أ: مسبار المقاومة الدقيق (الميكرولوج).

- **سجل الجهد الذاتي:**

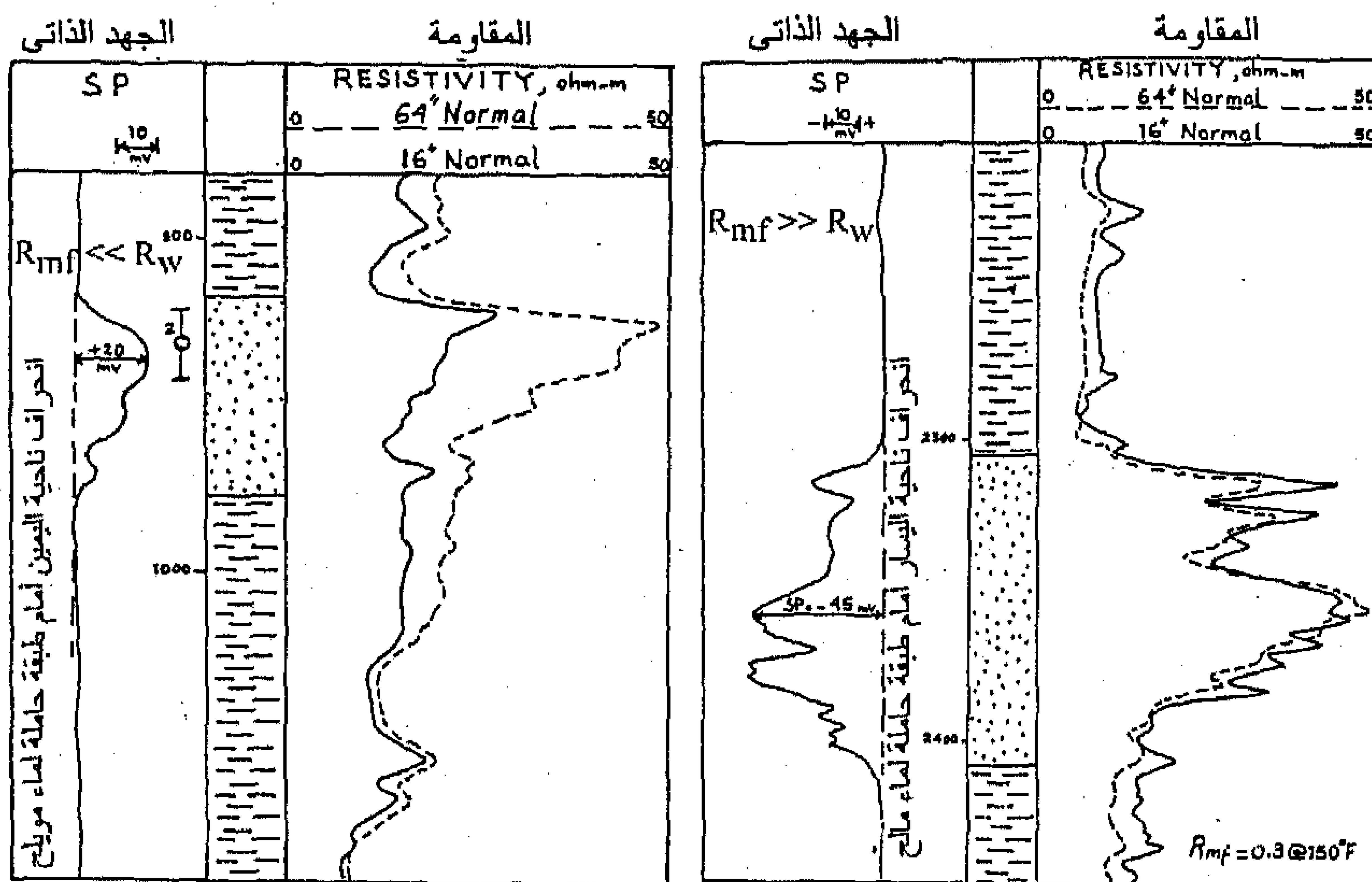
يجري تسجيل الجهد الذاتي self potential log عادة مصاحباً للتسجيلات الكهربائية الآنفة الذكر، ويسمى أيضاً سجل الجهد التلقائي spontaneous potential أو اختصاراً SP حيث إن الجهد الكهربائي المقاس هو حدث من تلقاء ذاته وبالتالي لا يحتاج إلى أقطاب لبث التيار الكهربائي خلالها كما هو الحال في سجلات المقاومة بل يقتضي فقط وجود قطبين اثنين للقياس هما (N وM)أحدهما مثبت على السطح والآخر متحرك داخل البئر أثناء عملية التسجيل (شكل ١٨-١٧). وتعتمد نظرية هذا التسجيل أساساً على ما يعرف بالجهد الكهروكيميائي electrochemical potential وهو أنه إذا وجد سائلان مختلفان في ملوحتهما ومتصلان ببعضهما فسوف تنشأ عن ذلك الاختلاف في الملوحة قوة دافعة كهربائية ذات جهد معين يقاس بالملي فولت (mv)، وفي الآبار الاستكشافية وغيرها يتمثل هذا الاختلاف فيما تحتويه الأوساط المحيطة بالبئر من ملوحة، وهي الطبقات المسامية (حجر رملي مثلاً) وما يعلوها ويسفلها من طبقات أخرى كالطَّفل وأيضاً سائل الحفر وراشحه ولكل وسط ملوحته الخاصة به، وعادة ما تكون الملوحة في الطَّفل أعلى منها في الطبقة المسامية أعلى منها في سائل الحفر، وبسبب هذه الاختلافات فإن منحنى الجهد الذاتي ينحرف ناحية اليسار ويكون سالباً أمام الطبقة المسامية ($Rmf >> Rw$) وإلى اليمين ناحية طبقة الطَّفل (شكل ١٨-١٨أ)، ولكن قد يحدث أحياناً أن ينحرف المنحنى إلى اليمين ناحية الطبقة المسامية وتعني هذه الحالة أن ملوحة راشح الحفر أعلى من ملوحة الطبقة المسامية ($Rmf << Rw$) ويفسر ذلك بأن هذه الطبقة تكون مشبعة بماء عذب أو ربما بماء مُويلح (مسوس) brackish (شكل ١٨-١٨ب)، أما إذا تساوت ملوحة راشح الحفر مع ملوحة الماء الطبقي ($Rmf = Rw$) داخل التكوين الجوفي فإن منحنى الجهد الذاتي لا يعطي إنحرافاً لا ناحية اليمين ولا ناحية اليسار ويكون خطاً مستقيماً مما يتعذر معه تحديد الطبقة المسامية وتسقط بالتالي فاعلية سجل الجهد الذاتي، ونظراً لاعتماد هذا السجل على ملوحة الماء الطبقي فإنه إذا ما أمكن تعيين قيمة المقاومة الكهربائية لهذا الماء Rw وذلك بمعرفة مقاومة راشح الحفر Rmf ومقدار انحراف الجهد الذاتي أمام الطبقة المعنية (SSP) فإنه يمكن تعيين مقاومة الماء الطبقي (Rw) وذلك حسب المعادلة التالية:

$$SSP = -K \log \frac{Rmf}{Rw}$$

حيث إن K هو معامل يتناسب مع درجة الحرارة المطلقة ويساوي (T_f) 61+0.133 وتكون T_f هي درجة حرارة الخزان الجوفي بالفهرنهيت.



شكل ١٨-١٧ : نظام سجل الجهد الذاتي.

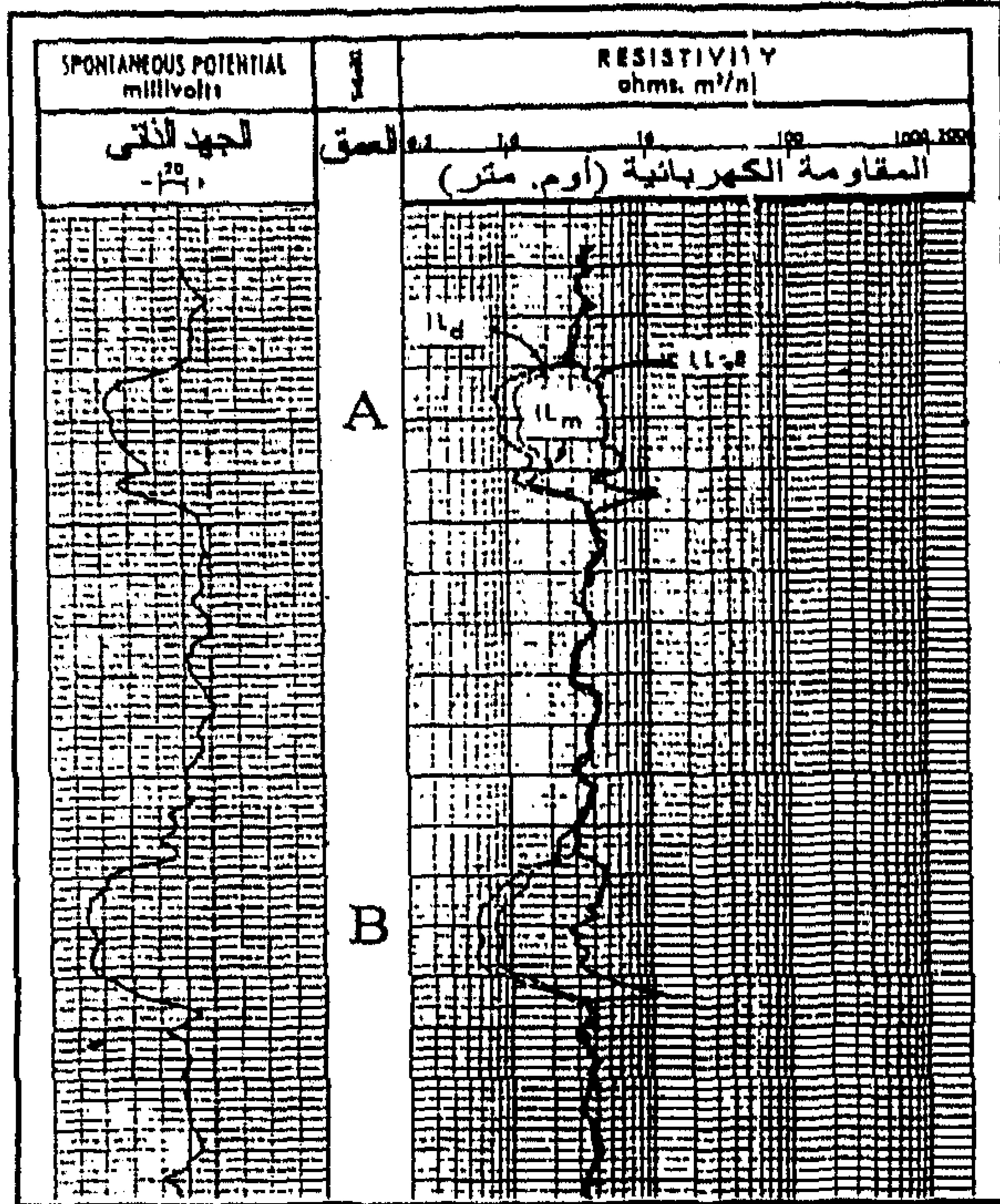


شكل ١٨-١٨ : سلوك الجهد الذاتي أمام الطبقات المنفذة في بئر بالصحراء الغربية.

وثمة مثال جدير بتقديمه للتدليل على كفاءة السجلات السابقة في تقييم التكوينات حيث يمثل الشكل ١٨-١٩ تسجيلات للمقاومة الكهربائية باستخدام المسابير العميقة (ILd) والمتوسطة (ILm) والدقيقة (LL-8) بالإضافة إلى منحنى الجهد الذاتي SP، ويوضح هذا الشكل وجود طبقتين مساميتين A وB حاملتين للماء إلا أن ملوحة الماء في الطبقة العليا أقل من مثيلتها في الطبقة السفلى بافتراض تساوي المسامية في كل منهما، كما يلاحظ أيضاً تباين (فروق) في قيم المقاومة الكهربائية المسجلة أمام هاتين الطبقتين، وتكون قراءة المسبار العميق (ILd) هي الأقرب للقيمة الحقيقية للمقاومة الكهربائية (Rt) حيث بقيت منطقة القياس بعيدة عن تأثيرات راشح الحفر واحتفظت بحالتها الأصلية، كذلك يلاحظ انطباق قيم المقاومة المسجلة أمام طبقات الطفل الفاصلة بين الطبقتين المساميتين ويرجع السبب بالطبع إلى عدم حدوث غزو لراشح الحفر داخل هذه الطبقات غير المنفذة.

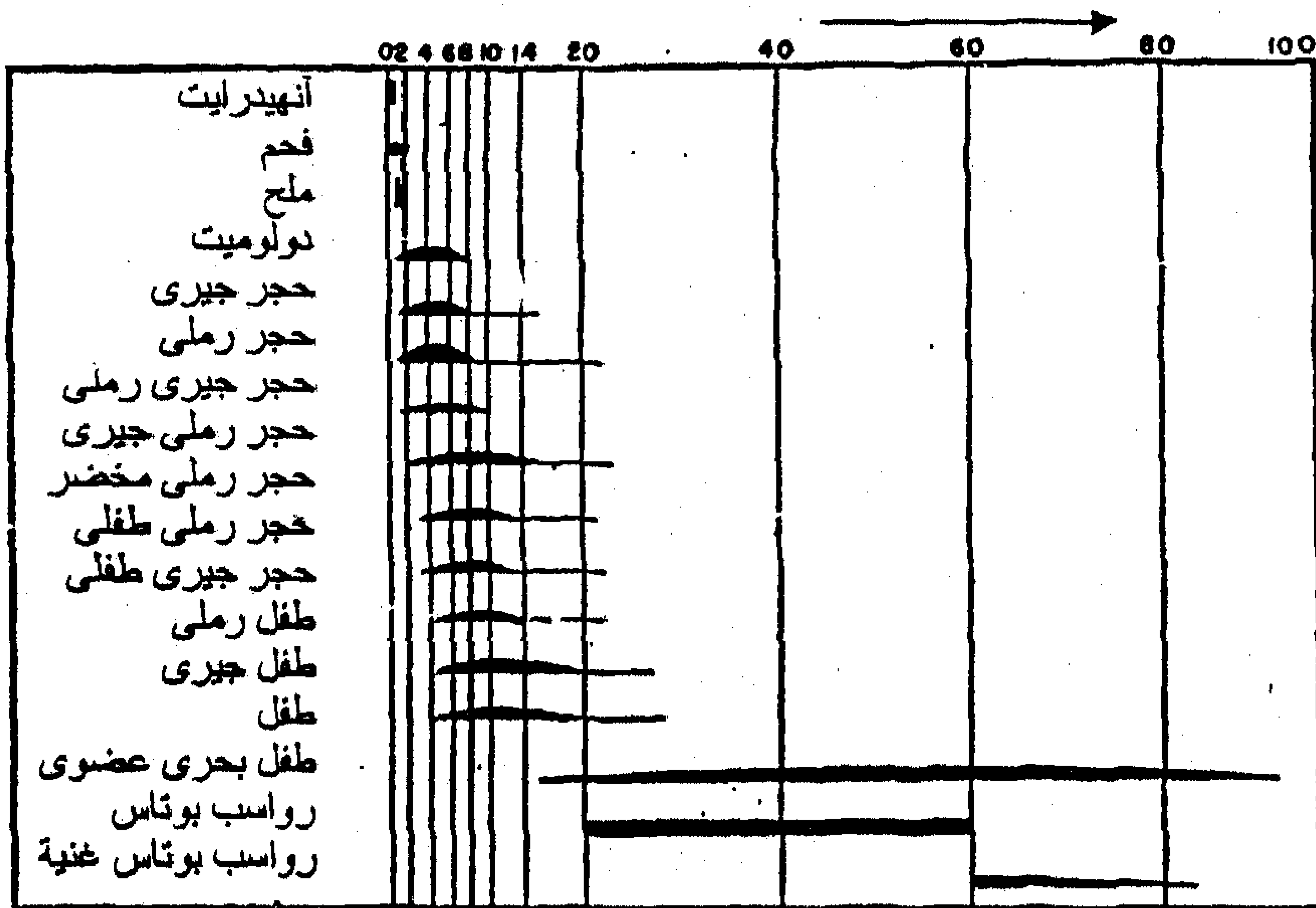
- **سجل أشعة جاما:**

سجل أشعة جاما gamma ray log هو قياس للإشعاعية الطبيعية natural radioactivity للصخور داخل الآبار والتي قد تحتوى في مكوناتها المعدنية على عناصر مشعة تعاني انحلالاً تلقائياً تنبعث معه أشعة ألفا وبيتا وجاما ذات الطاقات المختلفة (شكل ١٨-٢٠)، وأكثر هذه العناصر شيوعاً البوتاسيوم ٤٠ واليورانيوم والثوريوم. وأشعة جاما هي موجات كهرومغناطيسية مثل أشعة إكس ولها القدرة على الاختراق تتجاوز مواسير التغليف (القيسون) في الآبار مما يجعل بالإمكان الكشف عنها خلف هذه المواسير الصلبة. وفي معادن الصلصال clay يتعاظم وجود البوتاسيوم، ولهذا السبب فإن طبقات الطفل تعطي مستويات مرتفعة على سجل جاما مقارنة بطبقات الحجر الرملي والحجر الجيري والتي تتميز عادة بمستوياتها المنخفضة (شكل ١٨-٢٠)، ومن ناحية أخرى يوجد اليورانيوم بكميات ملموسة في رواسب الطَّفل الأسود العضوي مما يتسبب في تلك المستويات العالية لسجل جاما، كما أن رواسب أملاح البوتاسيوم وخامات اليورانيوم تكون أيضاً ذات مستويات إشعاعية مرتفعة.

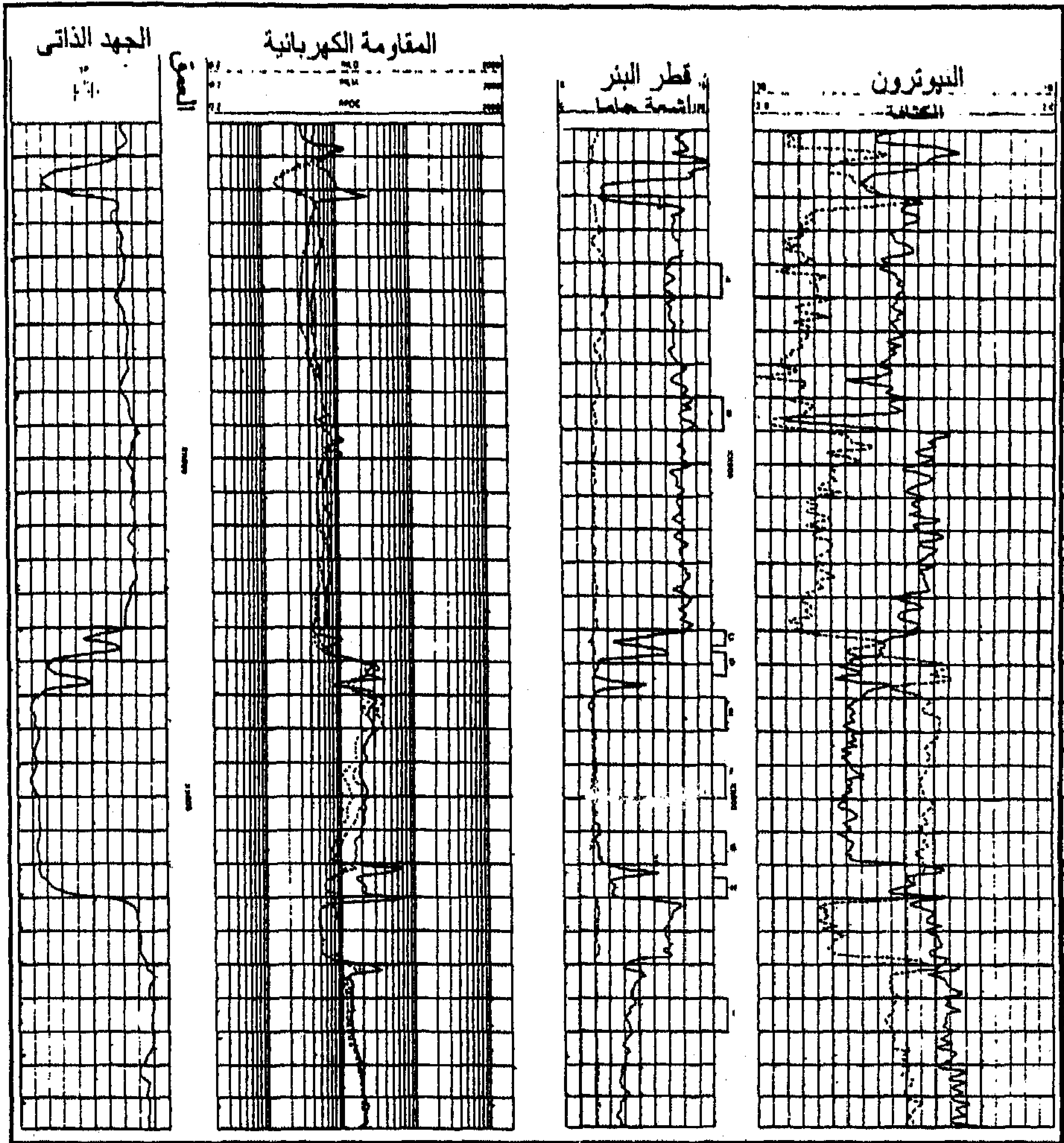


شكل ١٨-١٩: تسجيلات المقاومة باستخدام المسابير

يقة ILd والمتوسطة ILm والضحلة LL-8.



شكل ١٨-٢٠: مستويات الإشعاعية الطبيعية في الصخور الرسوبية المختلفة.



شكل ١٨-٢١: مجموعة من تسجيلات الآبار للجهد الذاتي والمقاومة الكهربائية وأشعة جاما والنيوترون والكثافة حيث يلاحظ بوضوح التشابه في استجابة منحنى أشعة جاما والجهد الذاتي أمام الطبقات المختلفة.

ويتكون مسبار الإشعاعية من عداد جايجر Geiger counter أو عداد الومضان scintillation counter الذي يدلى داخل البئر للكشف عن أشعة جاما، ونظراً لأن هذه الأشعة تنطلق على فترات غير منتظمة فإن سحب الجهاز من داخل البئر يكون بحركة بطيئة نسبياً حتى يمكن الحصول على تسجيل جيد، وتبلغ سرعة التسجيل عادة بواقع ٥٥٠ متراً (١٨٠٠ قدم) في الساعة، كما يتم معايرة المسبار بالوحدة التي حددها معهد البترول الأمريكي (API unit).

ويشبه منحنى أشعة جاما إلى درجة كبيرة منحنى الجهد الذاتي من حيث الشكل (١٨-٢١) فكل منهما يعكس محتوى الطفل في التكوين الجوفي؛ لذا فإنه في الحالات التي يتعذر فيها إجراء الجهد الذاتي فإن منحنى أشعة جاما يكون البديل لتحديد الطبقات والتمييز بينها حيث إن سجل الجهد الذاتي لايصلح في الآبار المبطنة والأخرى الفارغة أو تلك التي تحتوى على سائل حفر ذي ملوحة عالية. ويعتبر سجل أشعة جاما أداة جيدة في أعمال المضاهاة بين الآبار ولمسافات طويلة، كما أنه يمكن إجراؤه في الآبار المغلفة بصحبة مُحدِّد مواقع أطواق القيسون collar locator ولاختيار مسافات التثقيب بدقة أيضاً.

- **سجل أشعة جاما الطيفي:**

هو نظام متقدم من سجل أشعة جاما المعتاد حيث يمكن بواسطته التعيين الكمي للعناصر الأولية للإشعاعية الطبيعية وهي البوتاسيوم-٤٠ والبزموث-٢١٤ (وهو نظير ناتج في سلسلة اليورانيوم) والثاليوم-٢٠٨ (عضو في سلسلة الثوريوم)، بالاضافة إلى العد الإجمالي لأشعة جاما.

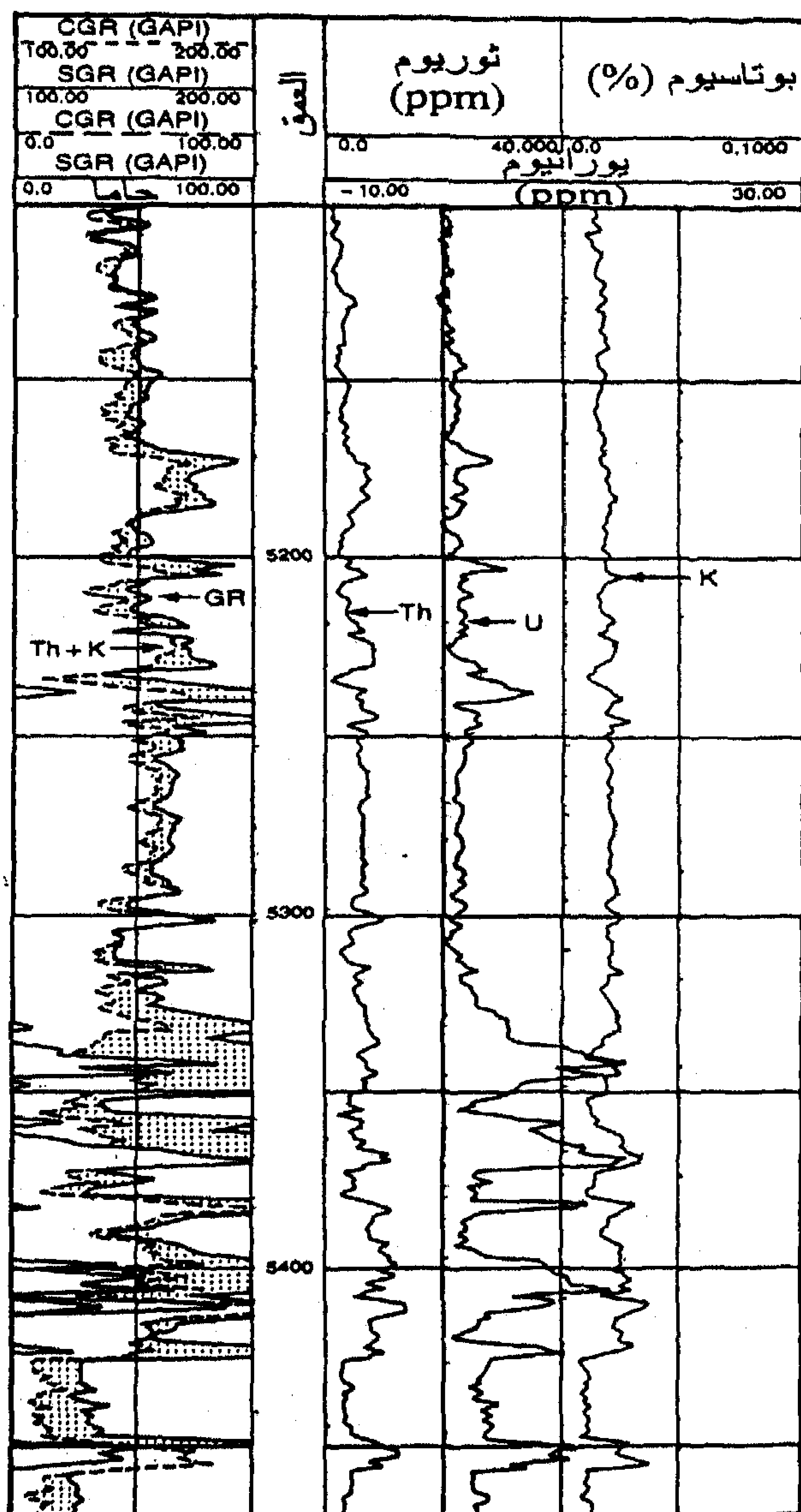
ويتكون المسبار المستخدم أساساً من مقياس للطيف spectrometer عالي التفريق لأشعة جاما وتمر الإشارات النبضية الواردة إليه خلال مضخم إلكتروني ثم إلى محلل متعدد القنوات الذي يبين كامل الطيف بالإضافة إلى نبضات مختارة داخل نوافذ الطاقة الخاصة بالنظائر السابقة، كما أن هناك حاسباً إلكترونياً لتحديد معدلات الطاقة عند كل نافذة.

وللسجل الطيفي spectral gamma ray log استخدامات مهمة في أعمال المضاهاة وتحديد صخور المصدر والتي تتميز غالباً بمحتواها من اليورانيوم (شكل ١٨-٢٢)، وكذا التقدير الكمي لمحتوى الصلصال والميكا والفلسبار عن طريق التحليل المفصل لأطياف أشعة جاما، وكذلك عند البحث عن النُّطُق المشققة والكهيفات والتجويفات الصخرية في التتابعات الكربوناتية حيث يمكن لليورانيوم الإكثار فيها عادة.

- **السجلات الإشعاعية الاصطناعية:**

بالاضافة إلى الإشعاعية الطبيعية يمكن إحداث إشعاعية اصطناعية artificial (induced) داخل الصخور وذلك باستخدام مصادر مشعة تنطلق منها النيوترونات أو

غيرها من الجسيمات الفائقة السرعة، ونظراً لخطورتها والأضرار البالغة لها يتم حفظ وتناول هذه المصادر وفق معايير عالية من الأمان والسلامة، وقد استحدثت هذه التقنية أساساً لتحديد الطبقات الصخرية وتعيين مساميتها وكأدوات فعالة في تقييم الخزانات الجوفية ليس فقط في الآبار غير المغلفة بل وفي الآبار المغلفة، وفيما يلي شروح مختصرة لهذه التقنية والأساليب المستخدمة.



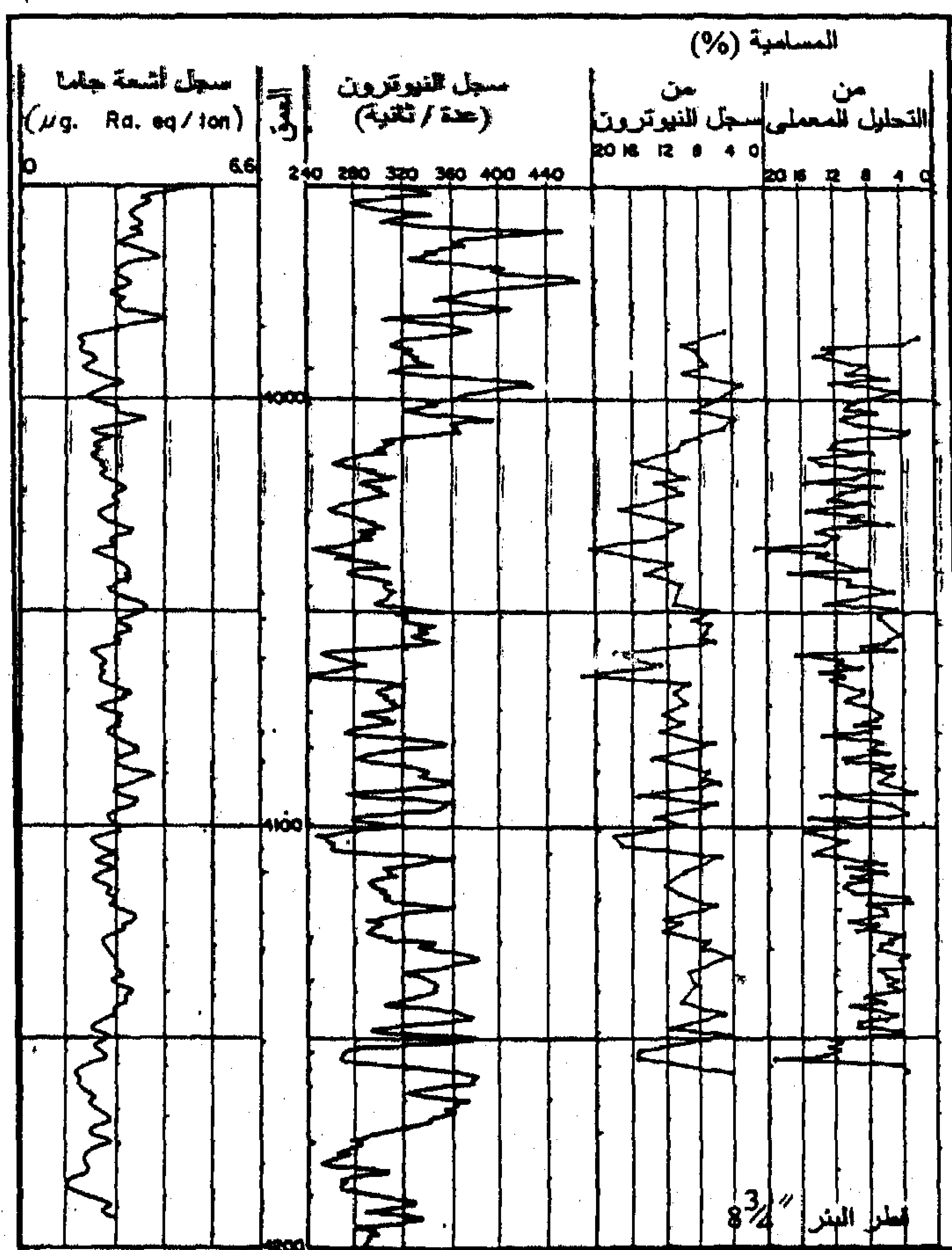
شكل ١٨-٢٢: استجابة منحنيات السجل الإشعاعي الطيفي.

(أ) سجلات النيوترون:

تقوم هذه التقنية على قذف الصخور بنيوترونات neutrons عالية السرعة حوالي ٥ مليون إلكترون فولت تنبعث من مصدر مشع مثل بلوتونيوم - بريليوم (PuBe) أو أمريكيوم - بريليوم(AmBe)، والنيوترونات هي جسيمات متعادلة وتتساوى في كتلتها 1.675×10^{-24} جم مع كتلة ذرة الهيدروجين تقريباً، وعندما تصطدم هذه النيوترونات المنطلقة من مصدرها بذرات التكوين الصخري فإنها تفقد جزءاً من طاقتها ويكون هذا الفقد كبيراً إذا كان الاصطدام مع ذرة صغيرة (مثل ذرة الهيدروجين) ومع الاصطدام تنخفض النيوترونات في سرعتها، أما إذا كان الاصطدام مع ذرة كبيرة يكون الفقد في السرعة محدوداً، ومع استمرار عملية الاصطدام يتزايد فقدان النيوترونات لسرعتها وطاقتها حتى تتمكن ذرات مثل الكلور والهيدروجين والسيليكون وغيرها في نهاية الأمر من أسر النيوترونات المبطأة مع إنبعاث أشعة جاما ذات طاقة عالية تعرف بالأشعة الأَسْرِيَّة capture gamma rays والتي يتم رصدها بواسطة مكشافdetector خاص مركب على مسافة معينة من المصدر المشع.

ويتزايد تركيز الهيدروجين في الطبقات المسامية حيث تتشبع المسام بالماء أو الهيدروكربون، وبالتالي فإن عملية تبطئة النيوترونات ستعكس مقدار تلك المسامية، وعندما يكون تركيز الهيدروجين في الصخور المحيطة بالمسبار كبيراً فإن أغلب النيوترونات يتم إبطاؤها ومن ثم أسرها بالقرب من المصدر، وعلى النقيض إذا كان هذا التركيز صغيراً فهذا يُتيح المجال للنيوترونات أن ترحل إلى مسافة بعيدة عن المصدر وتقترب من المكشاف قبل أن يتم أسرهاcapture ويسجل المكشاف إشارات وعدَّات مرتفعة كما لو كانت صادرة من نطاق ذي مسامية كبيرة، ولتوحيد تفسير المعلومات فقد جرى تصميم المسافة بين المصدر والمكشاف على أساس أن معدلات العد تكون كبيرة كلما كان تركيز الهيدروجين صغيراً والعكس بالعكس، ويوضح الشكل ١٨-٢٣ تسجيلاً لكل من النيوترون وأشعة جاما في إحدى الآبار الاستكشافية أمام طبقة من الحجر الجيري الدولوميتي وإلى اليمين قيم المسامية المشتقة من سجل النيوترون وتلك الناتجة عن التحليل المعملي للعينات اللبية المأخوذة لنفس الطبقة ويلاحظ التوافق الكبير بين قيم المسامية من السجل والتحليل المعملي مما يؤكد كفاءة سجل النيوترون في تقدير مسامية الخزان الجوفي.

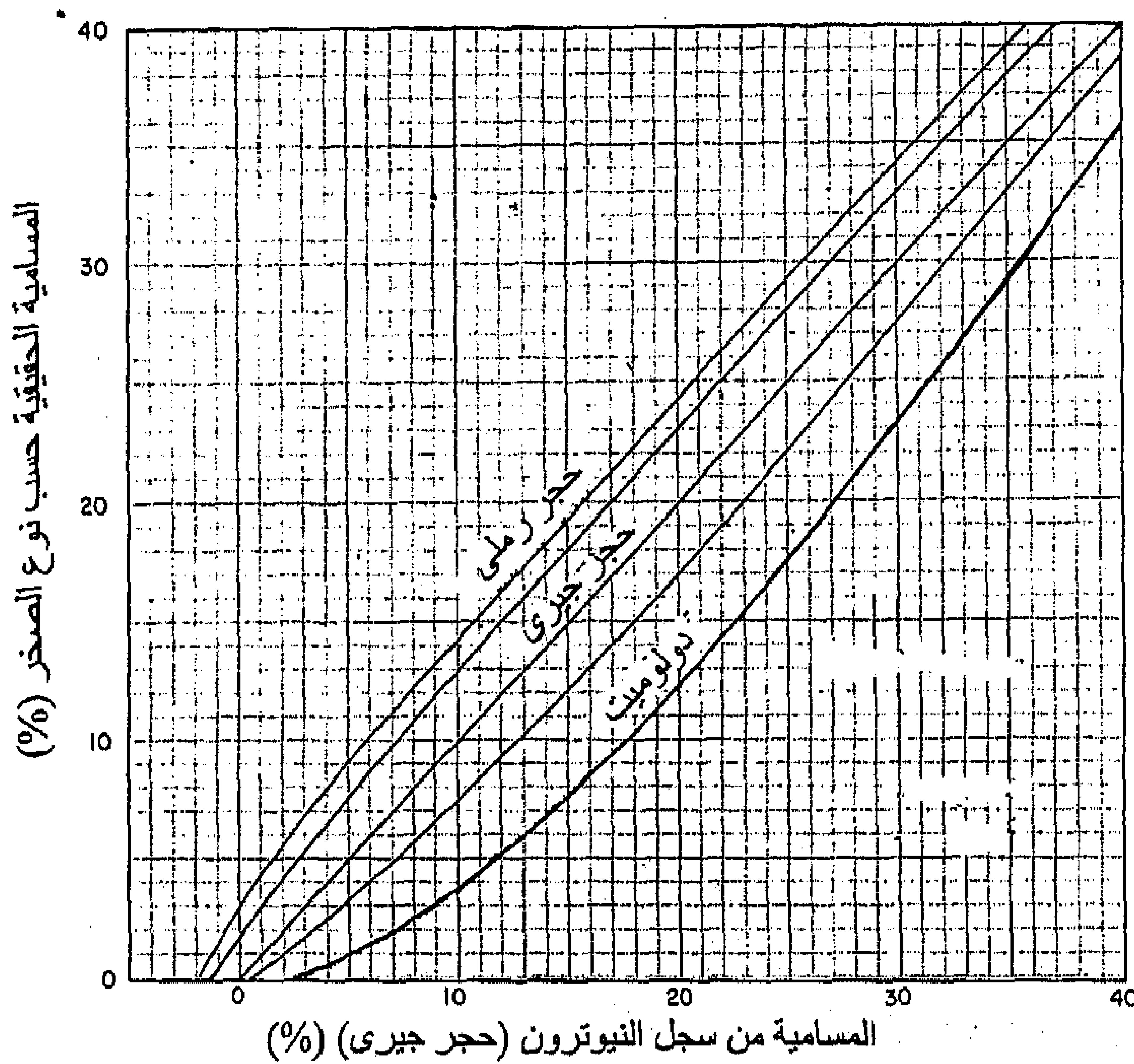
وكما يمكن عد أشعة جاما الأسرية فهناك إمكانية لعد النيوترونات المبطأة بوسيلة خاصة، وفي السجلات الحديثة تتم المعايرة في وحدات المسامية (نسبة مئوية أوكسر عشري)، وفي حالة الماء أو الزيت تكون قيم المسامية المستخلصة قريبة للواقع، أما الغاز فيؤثر على القيمة المقاسة وبالتالي إعطاء قيم للمسامية أقل من الحقيقة. وتفسير ذلك أن مسبار النيوترون يستجيب بالدرجة الأولى لكمية ذرات الهيدروجين الموجودة في الطبقات الصخرية، وحيث إن هذه الكمية في وحدة الحجوم تكون أقل في حالة الغاز بسبب الانتشار السريع للغاز وملئه لذلك الحجم مقارنة بالماء أو الزيت فإن سجل النيوترون يقرأ مسامية أقل من واقعها وهو ما سوف نشاهده في مثال قادم.



شكل ١٨-٢٣: مقارنة بين قيم المسامية الناتجة من التحليل المعملي للعينات اللبية وتلك المستنبطة من سجل النيوترون حيث يلاحظ التوافق الكبير بينهما.

ولتدارك عدم انتظامية جدار البئر يستخدم compensated neutron porosity tool (CNL) وهو جهاز خاص يعمل على تعويض وتصحيح البيانات الصادرة ورفع كفاءتها.

وبعد أن كانت التسجيلات النيوترونية تدرج بالعدَّات في الثانية counts per second أصبحت تدرج الآن في وحدات المسامية للحجر الجيري المعياري، وإذا ما كان الصخر المطلوب تقدير مساميته من الحجر الرملي تضاف عادة ٣-٤ وحدات على القراءة المأخوذة من السجل، وأما إذا كان من الدولوميت فتخصم من القراءة ٣-٧ وحدات تبعاً لنوع جهاز التسجيل، وأما إذا كان الصخر من الحجر الجيري فتؤخذ قيمة القراءة كما هي (شكل ١٨-٢٤).



شكل ١٨-٢٤: تصحيح قيم المسامية من سجل النيوترون حسب مادة هيكل الصخر.

(ب) سجل الكثافة:

يعرف سجل الكثافة density log أيضاً بسجل جاما – جاما gamma- gamma log وهو أحد سجلات الإشعاعية الاصطناعية لحساب مسامية الصخور، ويستخدم تسجيل الكثافة مصدراً إشعاعياً تنبعث منه أشعة جاما gamma rays إلى داخل التكوينات

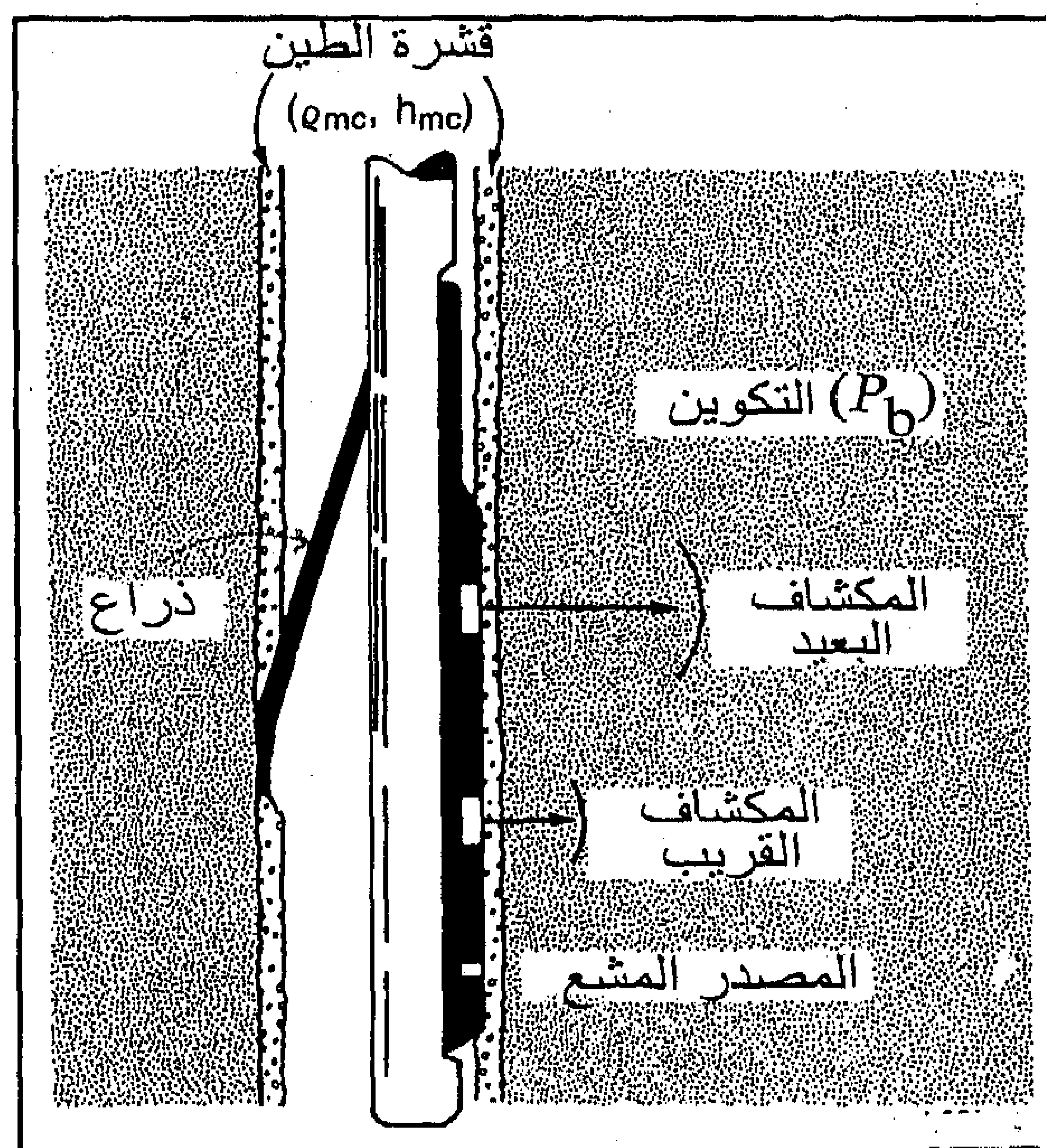
الصخرية (شكل ١٨-٢٥) حيث تصطدم بذرات إلكترونات العناصر المكونة لتلك التكوينات وتفقد جزءاً من طاقتها وتتبعثر ويتم امتصاصها وفق إحدى الآليات الثلاث التالية.

تأثير كومبتون (Compton effect): حيث تفقد أشعة جاما قدراً من طاقتها وتتناثر ويسمى هذا التأثير أيضاً تناثر أو تبعثر كومبتون Compton scattering.

التأثير الكهرضوئي (photoelectric effect): حيث يحدث امتصاص لتلك الأشعة الجامية ذات الطاقة أقل من ١٥٠ كيلو إلكترون فولت.

تأثير النتاج المزدوج (pair production): حيث يعطي الفوتون (كم ضوئي) الناتج من تأثير كومبتون كل طاقته وتكوين زوج من الجسيمات (إلكترون وبوزيترون).

ويعتبر المؤثران الأول والثاني المكونين الرئيسين في سجل الكثافة، ومن المصادر الإشعاعية المستخدمة الكوبلت - ٦٠ والسيزيوم - ١٣٤ والأنتيمون - ١٢٤ .



شكل ١٨-٢٥: رسم تخطيطي لمسبار الكثافة (جاما-جاما) ذي التباعد المزدوج.

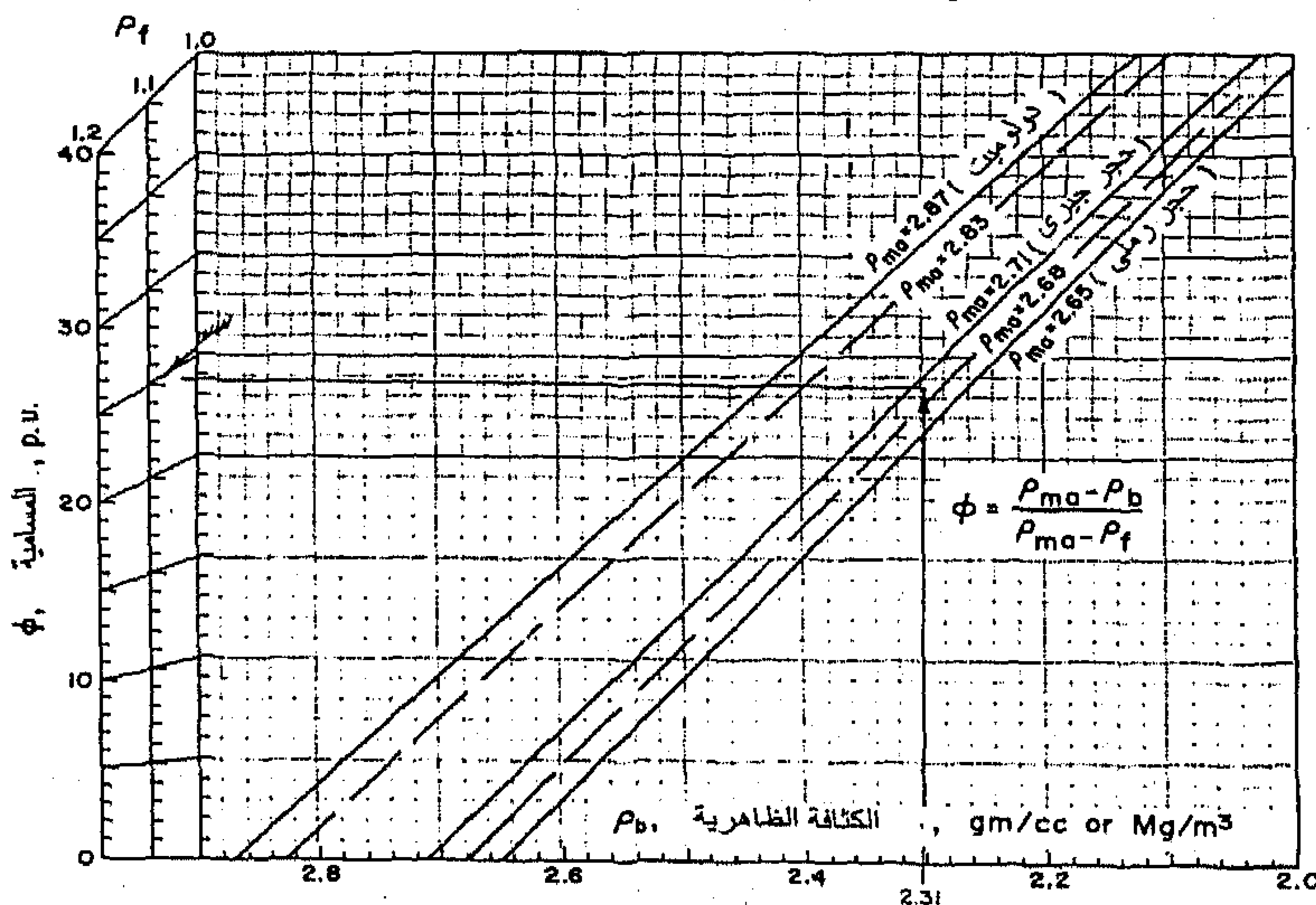
ويتم الحصول على سجل الكثافة عن طريق عد أشعة جاما المتبعثرة وتحويلها إلى وحدات الكثافة (جم/ سم³) أو المسامية (٪)، وكلما كثر عدد الإلكترونات في ذرات

العناصر المكونة للتكوينات الصخرية كان التبعثر كبيراً، ويتناسب عدد الإلكترونات في السنتيمتر المكعب من الصخر مع كثافة الصخر. فالصخور الكثيفة كالحجر الجيري والأنهيدريت تكون كثافتها عالية والعكس صحيح كلما كانت الصخور رخوة كانت كثافتها منخفضة.

ونظراً لأن تأثير قشرة طين الحفر mud cake قد يكون كبيراً فإن مسبار الكثافة يكون مثبتاً على حامل منزلق (مزلقة) skid ومزود بذراع من شأنها الضغط على جدران البئر وتقليص الفجوة بين المسبار والتكوين الصخري، كما يستخدم في الأجهزة الحديثة مكشفان بدلاً من مكشاف واحد (شكل ١٨-٢٥) وذلك بهدف تصحيح قراءات المسبار بصورة آلية في حالة عدم انتظام جدار البئر وتقليص أية مؤثرات بئرية أخرى، كما يظهر منحنى التصحيح بجانب المنحنى الرئيس المسجل.

ويجري حساب مسامية (ϕ) الصخور من سجل الكثافة من علاقة خطية بسيطة تربط بين كل من الكثافة الظاهرية (ρ_b) والتي يقرأها السجل وكثافة الموائع داخل المسام (ρ_f) والتي عادة تساوي الوحدة، وكذا كثافة مادة الصخر (الهيكل) (ρ_{ma}) وتتراوح بالنسبة للصخور الخزانية بين ٢،٦١ - ٢،٨٧سم³ وذلك حسب المعادلة الآتية والموضحة بيانياً في الشكل ١٨-٢٦.

$$\phi = \rho_{ma} - \rho_b / \rho_{ma} - \rho_f$$



شكل ١٨-٢٦: العلاقة بين الكثافة الظاهرية ومسامية الصخور.

هذا ويتم تسجيل الكثافة على المسار الثاني وتكون القراءات المسجلة إما بوحدات الكثافة (جم/ سم[٣]) أو بالمسامية (٪) معايرة بالحجر الجيري، وعليه فإذا كان الصخر حجراً رملياً فإن قيمة المسامية المسجلة ستكون غير حقيقية، لذا وجب إجراء تصحيح لها تبعاً لليثولوجية الصخر.

- **سجل الكثافة الليثولوجي:**

يتوقف التأثير والامتصاص الكهروضوئي على العدد الذري للعناصر الداخلة في التكوين الصخري ويعكس ذلك نوع الليثولوجية، ويقوم مسبار الكثافة الليثولوجي litho- density log على عد معدلات أشعة جاما من خلال نافذتين للطاقة حيث تقوم نافذة الطاقة المنخفضة بِعَدِّ وقياس ذلك الجزء من الطيف الذي يرجع إلى الكثافة الإلكترونية والتأثير الكهروضوئي، أما نافذة الطاقة العالية فتقيس مقدار تبعثر كومبتون، وبالتالي فإن النسبة بين معدلي العد يمكن استخدامها للحصول على المقطع العرضي للامتصاص الكهروضوئي (P_e)، وأن العد الخاص بالطاقة العالية هو ما يسجله منحنى الكثافة.

والجدول الآتي يبين القيم الشائعة لكثافة المادة الصخرية matrix (الهيكل) والمقطع العرضي الظاهري للامتصاص الكهروضوئي ويمكن الاستفادة من هذه القيم في عمليات التفسير الكمي لتسجيلات الكثافة عند حساب مسامية الصخور.

جدول ١٨-١: الكثافة النوعية والمقطع الكهروضوئي في الصخور.

الصخر (المعدن)	الكثافة النوعية	معامل الكهروضوئي Pe (بارن/ ذرة)
مرو (كوارتز)	٢،٦٥	١،٨١
كالسيت	٢،٧١	٥،٠٨
دولوميت	٢،٨٧	٣،١٤
انهيدرايت	٢،٩٦	٢،٩٨
ماء عذب	١،٠٠	٠،٣٥٨
ماء مالح	~١،١٢	١،١٢
الزيت	متغير	٠،١١٩
الغاز	متغير	٠،٠٩٥

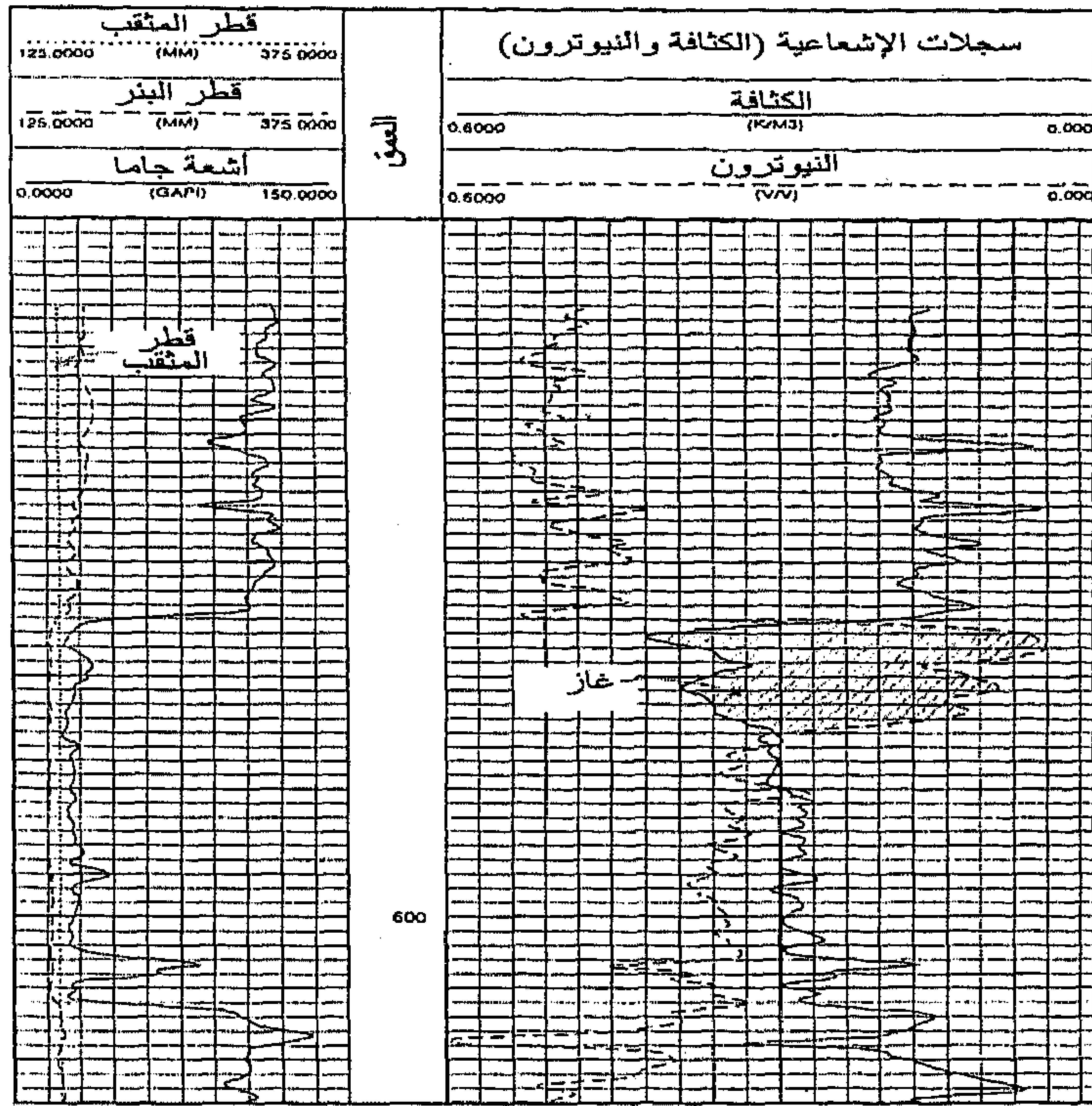
ويمكن تفسير سجل الكثافة الليثولوجي بمفرده، ولكن عادة مايتم ذلك بالتكامل مع سجل جاما الطيفي وذلك لتحسين التفسير في حالة الليثولوجية المعقدة، وبالطبع فإن لقيم الكثافة وقياسات المسامية أهمية بالغة في تعيين الليثولوجية ومحتوى الموائع داخل الخزانات البترولية.

تأثير الغاز:

علمنا أن المسام الصخرية إما أن تكون مشبعة بالماء أو الهيدروكربون، وقد أوضحنا فيما سبق أنه في حالة التشبع بالماء أو الزيت فإن استجابة سجل النيوترون أو الكثافة تكون دقيقة والمسامية المستنبطة قريبة للحقيقة، أما إذا كان الغاز هو السائد في المسام الصخرية ستكون قيمة المسامية المسجلة غير دقيقة حيث تبدو أقل من الواقع too low على سجل النيوترون وأعلى من واقعها too high بالنسبة لسجل الكثافة، وإذا ما وضع هذان السجلان جنباً إلى جنب فسوف يظهر انفصال separation أو انفراج divergance بين قراءتيهما (شكل ١٨-٢٧) مشيراً إلى وجود الغاز والكشف عنه، وإذا ما أجري تصحيح مناسب لإزالة هذا التأثير على قراءات سجل الكثافة فإنه يمكن بالتالي الحصول على قيم حقيقية للمسامية.

- **سجل قطر البئر:**

يقيس هذا السجل caliper log القطر الفعلي للبئر، ويتوقف هذا على حجم مثقب الحفر وقوة جدار البئر وسمك قشرة طين الحفر، والصخور الرخوة مثل الطفل والفحم تتكسر وتتكهف مما يؤدي إلى توسيع قطر البئر، أما الصخور الصلبة مثل الحجر الجيري والدولوميت والحجر الرملي فتكون أقطار البئر أمامها مساوية كثيراً لحجم المثقب، وأما طبقات الملح فغالباً ما تذوب عند استخدام سائل الحفر بالماء العذب مكونة كهوفاً وتجاويف كبيرة ربما أدت إلى مشكلات وتداعيات جسيمة (راجع أشكال ١٨-١٦ و٢١ و٢٧).



شكل ١٨-٢٧: الكشف عن وجود الغاز في الطبقات الجوفية والانفراج بين قراءتي الكثافة والنيوترون.

ويتكون المسبار المستخدم في قياس قطر البئر عادة من أربعة أذرع يمكن فتحها أوغلقها حسب الحاجة كما يمكن أن يكون جزءاً مصاحباً لمسابير أخرى مثل مسبار الكثافة والنيوترون والمقاومة الكهربائية وغيرها وعند إنزال الجهاز داخل البئر يكون مغلقاً، وعند الصعود من داخل البئر يتم فتح الجهاز وينشأ عن ذلك إشارات كهربائية تتناسب والحجم الفعلي للبئر، ويسجل المنحنى بالسنتيمتر أو البوصة، ويقارن بحجم المثقب الذي استخدم لحفر البئر وكلما كان اتساع البئر كبيراً انحرف المنحنى بوضوح ناحية اليمين.

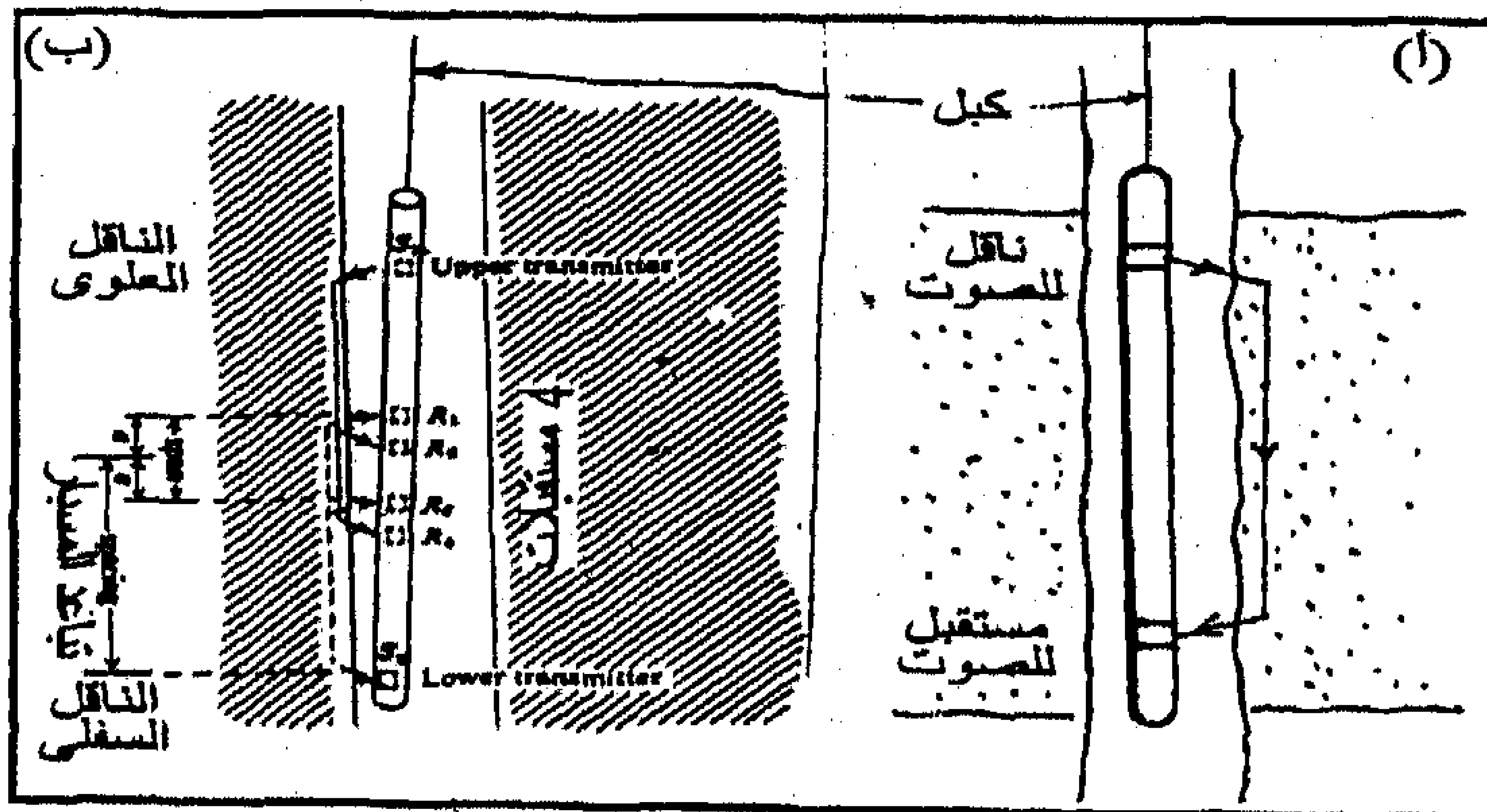
ويتم إجراء سجلات قطر البئر لسببين رئيسين: السبب الأول هو معرفة وتعيين الحجم الفعلي لاتساع البئر بغرض الحصول على معلومات للحسابات الهندسية، فمثلاً يقتضي معرفة هذا الحجم لتقدير كميات الأسمنت اللازمة لتغليف وتبطين البئر بالقيسون، أما السبب الثاني فإن كثيراً من السجلات الأخرى قد تحتاج إلى تصحيحات لتعويض البيانات الواردة من العمليات ذات الاهتمام وبالتالي يمكن الحصول على النتائج المرجوة.

كذلك فإن تحديد سمك قشرة الطين بواسطة سجل القطر من الأهمية بمكان حيث إن هذه القشرة لا تتكون عادة إلا أمام الطبقات المسامية والمنفذة بسبب تغلغل وغزو راشح الطين داخل المسام وترسيب محتواه الصلب على جدار البئر، ويكون تحديد هذه القشرة ليس فقط في التعرف على النُّطُق (الطبقات) المنفذة بل أيضاً في المساعدة على تصحيح البيانات والتقييم الكمي للتكوينات الجوفية.

- **السجل الصوتي:**

يقيس السجل الصوتي sonic (acoustic) log أو كما يطلق عليه أحيانا سجل السرعة الصوتية acoustic velocity log سرعة انتقال الموجة الصوتية داخل الصخور. ويتكون مسبار الصوت من ناقل أو مرسل للصوت transmitter بأعلى الجهاز وعلى مسافة منه يوجد زوجان من مستقبلين للصوت receivers يتباعدان بمسافة معينة، وتنقل النبضات الصوتية المنبعثة من الناقل إلى الصخر لترتد ثانية حيث يستقبلها جهاز الاستقبال (شكل ١٨-٢٨)، ويقدر الزمن الذي يستغرقه الصوت لينتقل من أحد المستقبلين إلى الآخر بالميكروثانية لكل قدم ويسمى هذا الوقت زمن العبور البيني interval transit time أو (Δt) للصخر، والجدول ١٨-٢ يبين القيم الشائعة لسرعة الموجات الصوتية داخل الصخور الرسوبية والغاز والماء.

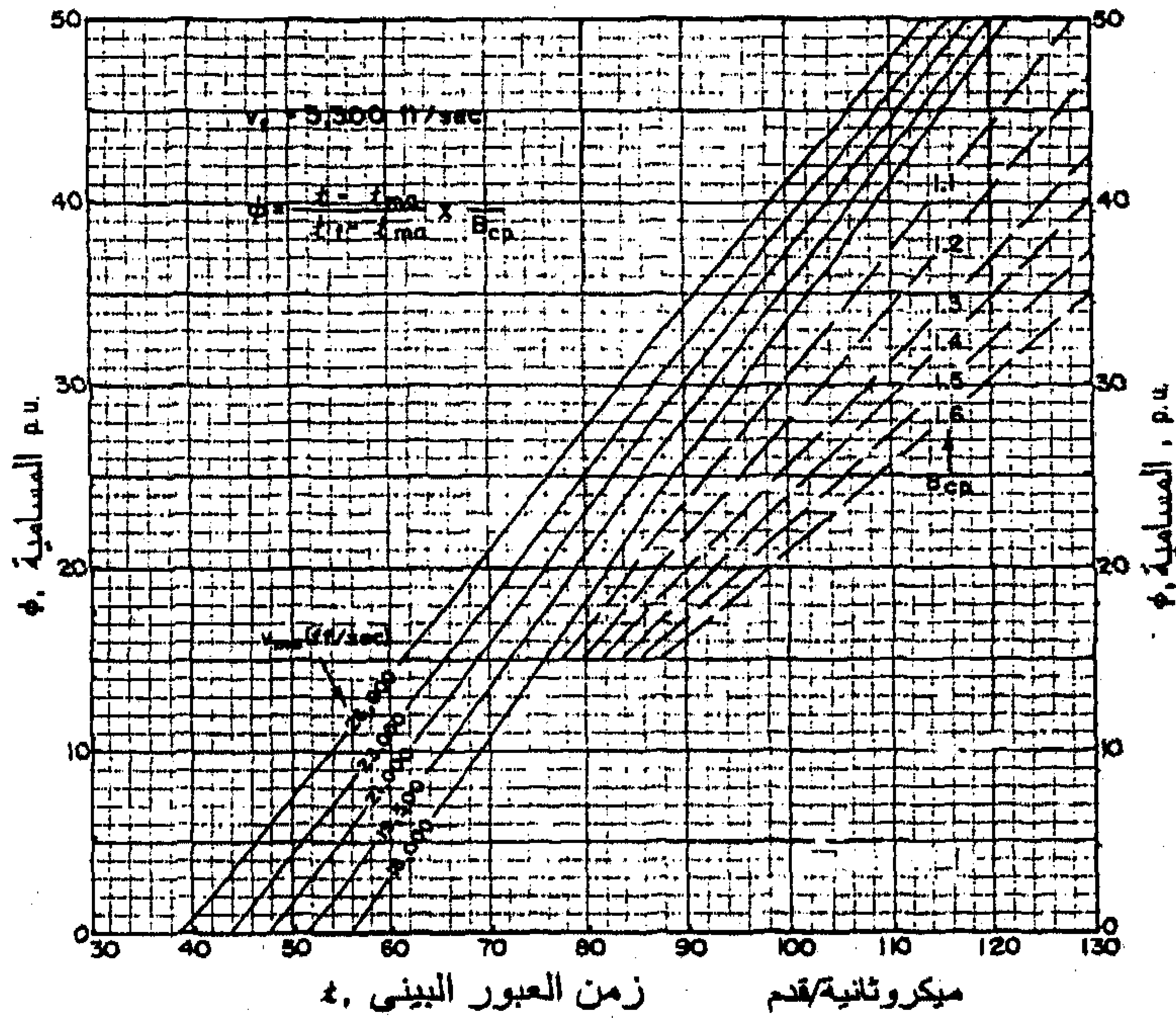
ومن بين الصخور الرسوبية تكون السرعة الصوتية في الطفل هي الأقل تليها السرعة الأعلى في الحجر الرملي وتكون السرعة في الحجر الجيري هي الأكثر عُلواً كما هو مبين بالجدول وكما هو موضح بالشكل ١٨-٢٩.



شكل ١٨-٢٨: رسم تخطيطي لمسبار الصوت باستخدام (أ) مستقبل واحد (ب) أربعة مستقبلات وناقلين للصوت.

جدول ١٨-٢: قيم السرعات الصوتية وزمن العبور في الأوساط المختلفة.

الوسط	السرعة		زمن العبور البيني (Δt)	
	متر / ثانية	قدم / ثانية	ميكروثانية / قدم	ميكروثانية / متر
الطفل	٥١٨٢-٢١٣٤	١٧٠٠٠-٧٠٠٠	٤٧٢-١٩٤	١٤٤-٥٩
الحجر الرملي	٤٨٧٧-٣٥٠٥	١٦٠٠٠-١١٥٠٠	٢٨٥-٢٠٣	٨٧-٦٢
الحجر الجيري	٥٦٣٩-٣٩٦٢	١٨٥٠٠-١٣٠٠٠	٢٥٣-١٧٧	٧٧-٥٤
الدولوميت	٦٠٩٦-٤٤٧٥	٢٠٠٠٠-١٥٠٠٠	٢٢٠-١٦٤	٦٧-٥٠
الغاز الطبيعي	٤٥٦	١٥٠٠	٢١٨٨	٦٦٧
الماء	١٥٢٤	٥٠٠٠	٦٥٦	٢٠٠



شكل ١٨-٢٩: العلاقة بين زمن العبور البيني ومسامية الصخور.

وهناك مدى واسع للسرعات الصوتية داخل الصخور الرسوبية حيث يتوقف ذلك على عدد من البرامترات مثل ليثولوجية الصخر ومساميته وما قد يحتويه من غاز أو ماء، وعلى العموم فإن السرعة في الصخور الرسوبية تكون أقل منها في الصخور الصلبة والكثيفة حيث إن وجود الموائع داخل المسام يعمل على توهين السرعة وإضعافها.

ومن خلال التجارب المعملية توصل وايلي M.R.J.Wyllie إلى وجود علاقة خطية بين زمن العبور للموجات الصوتية ومسامية الصخر المتماسك (شكل ١٨-٣٠) وفق المعادلة الآتية:

$$\Delta t_{log} = \phi \Delta t_f + (1-\phi)\, \Delta t_{ma}$$

وتكون (Δt_{log}) هي قراءة السجل الصوتي بالميكروثانية / متر أو بالقدم و(Δt_f) هو زمن العبور للمائع داخل المسام مقدرة بنحو ٦٢٠ ميكروثانية / متر أو ١٨٩ ميكروثانية/ قدم والتي تقابل سرعة مقدارها ١٦١٥ متر / ثانية أو ٥٣٠٠ قدم / ثانية وتكون (ϕ) هي المسامية. أما (Δt_{ma}) فتمثل زمن العبور خلال مادة الصخر (الهيكل) matrix وهي على النحو التالي:

جدول ١٨-٣: أزمنة عبور الموجات الصوتية داخل الأوساط المختلفة.

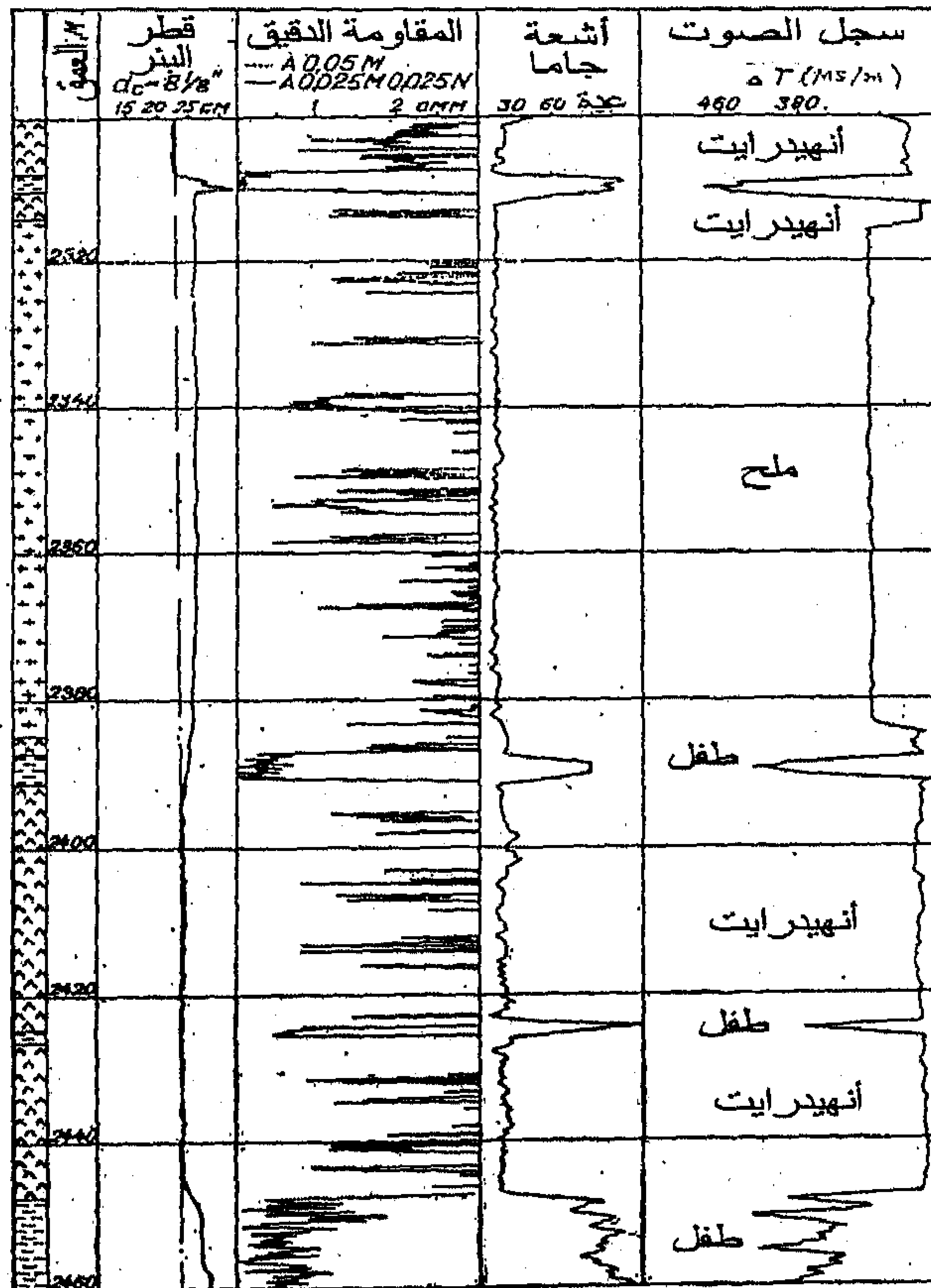
الوسط	مدي زمن العبور الهيكلي (Δt_{ma})		زمن العبور الشائع استخداماً	
	ميكروثانية / متر	ميكروثانية / قدم	ميكروثانية / متر	ميكروثانية / قدم
الحجر الرملي	١٦٧ – ١٨٢	٥١ – ٥٥,٥	١٦٧ – ١٨٢	٥١ – ٥٥,٥
الحجر الجيري	١٤٣ – ١٥٦	٤٣,٥ – ٤٧,٦	١٤٣-١٥٦	٤٣,٥-٤٧,٥
الدولوميت	١٤٣	٤٣,٥	١٤٣	٤٣,٥
الأنهيدرايت	١٦٤	٥٠	١٦٤	٥٠
الملح	٢١٩	٦٦,٧	٢١٩	٦٧
القيسون (حديد)	١٨٧	٥٧	١٨٧	٥٧

أما إذا كانت الصخور غير منضغطة بالقدر الكافي فإن قراءة السجل الصوتي لزمن العبور ستكون أعلى من المفترضة وتكون قيم المسامية المستنبطة مغلوطة، لذا يتطلب الأمر إجراء تصحيح يعرف بتصحيح الانضغاط correction for compaction (Cp) حتى تستقيم بذلك معادلة وايلي، وتصبح على النحو التالي وكما هو موضح بالشكل ١٨-٢٩.

$$\phi_c = \frac{\Delta t_{log} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \cdot \frac{1}{Cp}$$

حيث تعطي قيمة Cp تقريباً بقسمة سرعة الصوت في طبقة طفل مجاورة على ١٠٠ أو باستخدام أساليب أخرى من خلال استجابة مسابير المسامية المختلفة ومدى تأثر قراءاتها بوجود الطفل ($c_p = \Delta t_{shale} / 100$).

ولتقليص التأثيرات البئرية (عدم انتظام اتساع البئر، ميل وانحراف المسبار) فقد صمم مسبار الصوت المعادَل borehole compensated sonic (BHC) من زوج من ناقلي الصوت أحدهما علوي والآخر سفلي وبينهما زوجان من أجهزة الاستقبال (R_1, R_2, R_3, R_4) ويكون إطلاق النبضات الصوتية واستقبالها بشكل تبادلي، ويتم الحصول على معدل الزمن الناتج بطريقة أوتوماتيكية (راجع شكل ١٨-٢٨)، وتكون القيمة المتوسطة هي التي يقوم السجل الصوتي بتسجيلها على المسار الثاني أو الثالث، وتميل القراءات العالية إلى الجانب الأيمن من السجل بينما القراءات المنخفضة إلى الجانب الأيسر منه.



شكل ١٨-٣٠: استجابة سجل الصوت أمام طبقات الطفل والملح والأنهيدرايت والصخور الأخرى في بئر بخليج السويس.

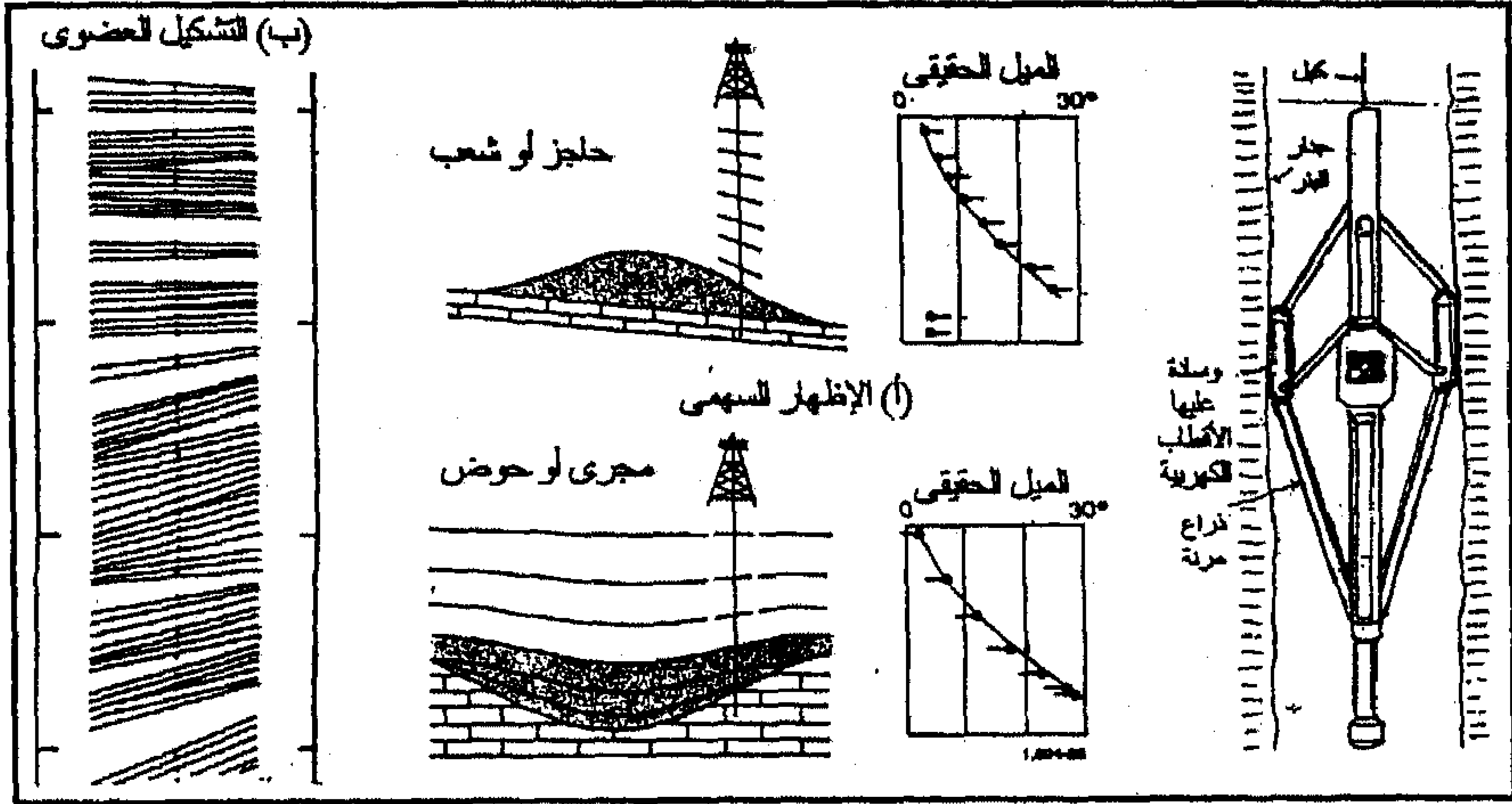
ويستجيب السجل الصوتي للمسامية البينحبيبية intergranular porosity متجاوزاً تلك المسامية الناشئة عن الشقوق أو ما تعرف بالمسامية الثانوية secondary porosity، وإذا كان المطلوب هو حساب هذه الأخيرة فإنه يمكن باستخدام معطيات المسامية من سجل النيوترون أو الكثافة وكل منها يعطي المسامية الكلية total porosity وبطرح المسامية البينحبيبية من المسامية الكلية نحصل على المسامية الثانوية وهي قيمة ذات أهمية خاصة في الصخور الجيرية وحيث تكثر الشقوق والتجاويف داخل التكوين الصخري. ويستخدم سجل الصوت في أحوال كثيرة في أغراض المضاهاة مع سجل أشعة جاما حيث يمكن لسجل الصوت التمييز بين طبقات الملح والأنهيدرايت حيث تكون قراءة زمن العبور أعلى قليلاً في الملح عنه في الأنهيدرايت بينما يعطي سجل جاما قراءة لقيم واطئة أمامهما ودون تمييز بينهما، كما أن قراءات منحنيات المقاومة الكهربائية تبدو عالية للغاية دون تفرقه أيضاً وهو ما يبدو واضحاً في الشكلين ١٨-١٦ب و١٨-٣٠ حيث تسجيلات المقاومة الكهربائية (الميكرولوج) وأشعة جاما والسجل الصوتي بإحدى الآبار في منطقة خليج السويس التي يتعاظم بها وجود طبقات المتبخرات من الملح والأنهيدرات التي تعلو خزانات الحجر الرملي المنتجة للبترول هناك وبالتالي تبدو أهمية سجل الصوت في التمييز بين الملح والأنهيدرايت بينما قراءات أشعة جاما واحدة تكون دون اختلاف ملحوظ.

ومن السجل الصوتي أُضيفت تقنية جديدة وهي سجل الكثافة المتغيرة variable density log والذي يتعامل مع أزمنة الوصول المختلفة لكل من الموجات الصوتية الطولية والمستعرضة والسطحية من خلال هذه الأزمنة حيث يمكن تحديد معامل المرونة elastic modulus وبالتالي تحديد موقع الطبقات المسامية وكذا الشقوق داخل الصخور.

وهناك تقنية أخرى للموجات الصوتية وهي ما تعرف بالمنظار البشري borehole viewer حيث تنبعث هذه الموجات وتنعكس من جدار البئر ويتم تسجيلها على سجل للكثافة المتغيرة وهو ما يعطي صورة لداخل البئر بعد معالجة المعطيات ويمكن التعرف على الشقوق بالطبقات واتجاهاتها، وهناك مغناطومتر بالجهاز من شأنه تعيين المجال الأرضي المغناطيسي والاتجاهات المختلفة.

- **سجل الميل:**

يتكون مسبار الميل dipmeter من عدة أذرع يحتوي كل منها على أقطاب كهربائية صغيرة لقياس المقاومة الكهربائية الدقيقة microresistivity أو أن تكون على هيئة وسادات من المطاط rubber pads عليها مجموعات من الأقطاب الكهربائية لنفس الغرض (شكل ١٨-٣١)، وعند سحبه إلى الخارج تفتح الأذرع التي لا تلبث أن تتمدد لتدرك جوانب البئر وتلامسها وتتمكن بالتالي من قياس المقاومات المختلفة، وإذا كانت الطبقة الصخرية مائلة فإن أذرع المسبار سوف تلامسها عند أعماق مختلفة، وإذا كانت الطبقة أفقية فإن تلامس الأذرع سيتم في نفس الوقت، أما اتجاه المسبار فيتحدد بواسطة مغناطومتر (جيروسكوب)، وبمعرفة تتابع التلامسات بين الأذرع المختلفة وكل طبقة يمكن حساب ميل الطبقات.



شكل ١٨-٣١: مسبار الميل وتمثيل بيانات التسجيل وتفسيراتها.

وثمة طريقتان لتمثيل بيانات سجل الميل: الطريقة الأولى وتعرف بالإظهار السهمي tadpole display حيث توقع زاوية الميل على المحور الأفقي وتكون قيمة الميل صفراً عند أقصى اليسار، ويكون العمق بالبئر ممثَّلاً على المحور الرأسي للمخطط (شكل ١٨-٣١أ). وتمثل الدائرة الموجودة على الشكل مقدار الميل والعمق عند نقطة معينة، أما الذيل الصغير فيمثل اتجاه الميل بالنسبة للشمال الجغرافي، وفي الطريقة الثانية (التشكيل العَصَوي) stick plot يكون توقيع البيانات على شكل عصي sticks ويُمثَّل العمق على المحور الرأسي، ويحدد عندما يتقاطع الخط مع محور البئر، كما أن ميل الخط هو مقدار زاوية الميل (شكل ١٨-٣١ب).

• **سجل الرنين المغناطيسي النووي:**

يقيس سجل الرنين المغناطيسي النووي nuclear magnetic resonance log (NMRL) الحركة البدارية الحرة free procession للبروتونات protons (نويات الهيدروجين) في المجال المغناطيسي للأرض، وينظر إلى البروتونات على أنها مغناطيسات جيروسكوبية صغيرة، وفي غياب المجال المغناطيسي فإنها تكون ذات توجيه عشوائي، أما إذا تعرضت لمجال مغناطيسي لوقت كاف فإن البروتونات تترتب وتصطف في اتجاه هذا المجال، وإذا ما تحول عنها المجال المغناطيسي بشكل سريع فإن البروتونات لا تكون قادرة على متابعة التغير المفاجئ وسوف تتبادر حول المجال الأرضي وتُحدث حركة البروتونات إشارات ذات سعات تتناسب وعدد البروتونات الموجودة بالتكوين الجيولوجي، ويسمى الزمن اللازم لبناء استقطاب هذه البروتونات فترة التراخي relaxation time (T_1)، وقد وجد أن بروتونات الهيدروجين في الأجسام الصلبة لها فترات تراخ قصيرة للغاية بينما في حالة وجود الموائع بالطبقات المسامية تكون تلك الفترات أكبر كثيراً، لذلك فإن مسبار التسجيل يقيس فقط مقدار الموائع المتحركة داخل المسام وما يعرف بدليل المائع الحر free fluid index (FFI) وذلك حسب المعادلتين التاليتين:

$$FFI = (1 - S_{wr})\,\phi$$
$$K = 0.125\,\phi^4\,10^{-4} / (1 - FFI / \phi)^2$$

حيث (S_{wr}) هي مقدار التشبع بالماء غير القابل للاختزال أو الانتقاص و(K): النفاذية (ملي دارسي) و(ϕ) هي المسامية ويمكن الحصول عليها من نتائج تحليل العينات الصخرية في المعمل أو استنباطها من تفسيرات تسجيلات الآبار كما سبق الإشارة إلى ذلك.

وهناك تطبيق حديث لسجل الرنين المغناطيسي وهو إمكانية قياس حجم الهيدروكربونات المختلفة في النطاق المغزو وذلك عن طريق معالجة راشح طين الحفر بأيونات بارامغناطيسية مما يجعل الإشارات الواردة من الراشح تضمحل سريعاً مقارنة بإشارات الهيدروكربونات وبالتالي يمكن استبعادها.

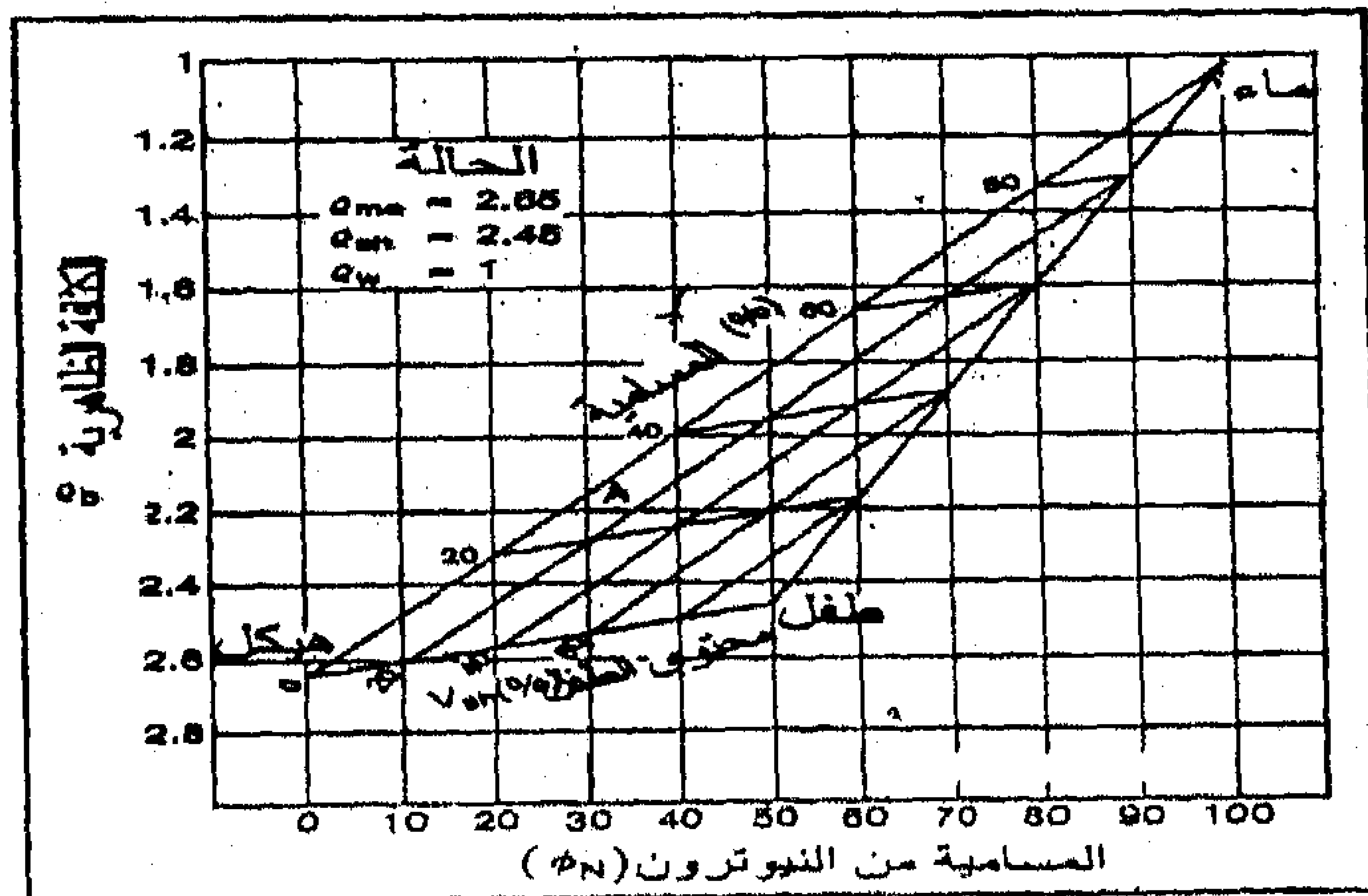
التصحيحات والحسابات:

عند التقدير الكمي للخصائص البتروفيزيائية للخزانات الجوفية مثل المسامية والتشبع بالماء والتشبع بالزيت أو الغاز أو الزيت المتحرك moveable oil وغيرها يتطلب

الأمر إجراء تصحيحات لقراءات المسابير المستخدمة بسبب تلك التأثيرات البشرية مثل اتساع قطر البئر ومقاومة سائل الحفر ودرجة حرارة الخزان وغيرها وهذا يمكن عمله باستخدام المخططات charts المتداولة في هذا الشأن، كما أن هناك إصدارات تقدمها الشركات العاملة في المجال يمكن الرجوع إليها.

وفي كثير من الأحوال فإن استخدام أكثر من سجل والتعامل مع العروض التقاطعية crossplots يؤدي إلى نتائج أكثر وثوقية من تلك المستنبطة من السجل الواحد، حيث تتأثر سجلات النيوترون والكثافة والصوت بكل من ليثولوجية الصخر ومساميته بصورة متفاوتة، كذلك فإن العمل اليدوي قد يكون مضنياً وبالتالي فإن استخدام البرمجيات والحاسوب يكون مفيداً للغاية لكن العبرة هو أن البيانات التي يتم إدخالها تكون على درجة عالية من الدقة وأن البرمجيات والمعلوماتيات ينبغي استخدامها بحرفية كبيرة وأنه كلما تزاوجت البيانات وتعددت مصادرها تقلصت الأخطاء وتعاظمت المصداقية في تقييم التكوينات.

ومع أن أساليب تسجيل الخصائص تتحسن باستمرار فإن سجلاً واحداً قد لا يستطيع إجمالاً تحديد خاصية مهمة بعينها بدقة كافية، فإذا استخدمت مجموعة مناسبة من السجلات أمكن القضاء على العوامل المعيقة أوعلى الأقل تخفيضها. والشكل ١٨-٣٢ مثال لأحد العروض التقاطعية باستخدام سجلي النيوترون والكثافة وتظهر عليه نقاط الماء والهيكل والطفل مدرجة بقيم المحتوى الطفلي (Vsh) وبالمسامية (ϕ)، وحيث تمثل النقطة A المعروضة للإيضاح قراءات تسجيل الكثافة $\rho_b = 2.2$ وتسجيل النيوترون ϕ_N على حين تعطي التفسيرات قيماً لكل من ٪23 = ϕ و$V_{sh} = 16\%$ وهي نتائج أكثر وثوقية عما إذا ما جاء استنباطها من سجل بمفرده.



شكل ١٨-٣٢: عرض تقاطعي لإيجاد المسامية ومحتوى الطفل باستخدام سجلي الكثافة والنيوترون.

وإذا ما عرفت المسامية (ϕ) أمكن حساب التشبع بالماء (S_W) أو الهيدروكربون (S_H) وذلك باستخدام معادلة آرشي Archie الشهيرة والتي تدون في صورتها المبسطة على النحو التالي:

$$S_w = a \phi^{-m} R_w / R_t$$

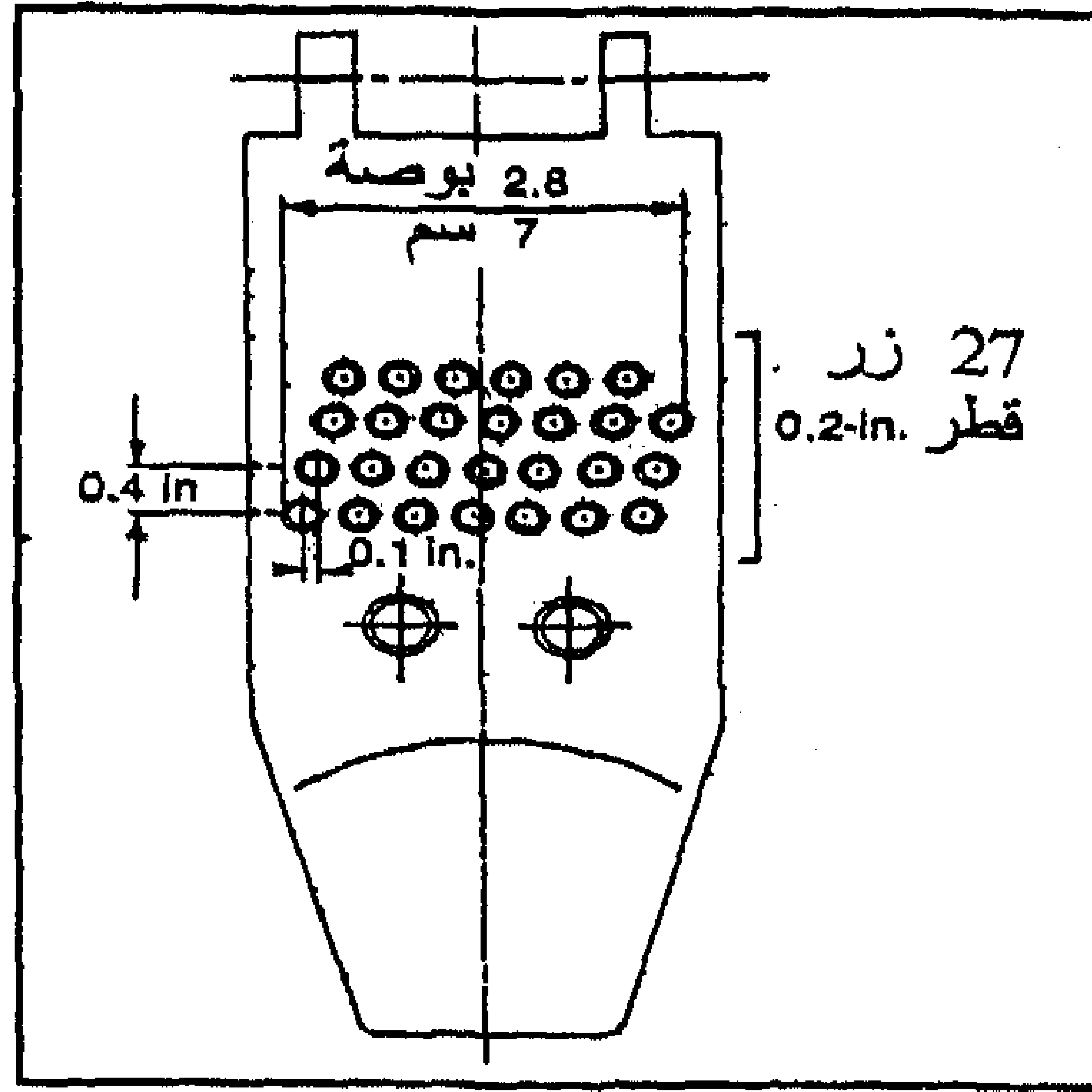
حيث a و m ثابتان يتوقف مقدارهما على ليثولوجية الصخر و R_w مقاومة الماء الطبقي و R_t المقاومة الحقيقية للطبقة الخازنة، وجميع هذه الخصائص يمكن استنباطها من تفسيرات تسجيلات الآبار.

سجلات أخرى:

ليست هذه السجلات جديدة لمسابير مستحدثة لقياس خصائص بتروفيزيائية أخرى ولكنها في الواقع تحايلات تستهدف إبرازاً لعدد من تلك الخصائص في ثوب جديد يسهل التعامل معها والاستفادة منها في الأغراض المعنية.

- **السجلات المصورة:**

تقدم السجلات المصورة imaging logs صوراً ملونة وغير ملونة للصخور التي اخترقتها البئر باستخدام قراءات المقاومة الكهربائية أو الفوقسمعيات، وعند الاستفادة من المقاومة يكون المسبار مزوداً بعدد كبير من الأقطاب الكهربائية الصغيرة وذات تباعدات قصيرة مركبة على وسائد تحملها أذرع خاصة كما هو الحال في سجل الميل، ويعتبر المسبار الماسح الطبقي الدقيق Formation Microscanner (FMS) من الأجهزة المستخدمة في الحصول على صور طبق الأصل لجدار البئر عن طريق التغيرات في قيم المقاومةالكهربائية الدقيقة، ويتألف هذا الجهاز من أربع وسائد مترابطة باتساق يحوي مجموعتين من الأقطاب الكهربائية المجموعة الأولى لقياسات الميل والمجموعة الثانية للحصول على صورة طبق الأصل للبئر، ويبين الشكل ١٨-٣٣ التشكيل الوسادي لجهاز FMS ووضع وترتيب الأقطاب على الوسادة.



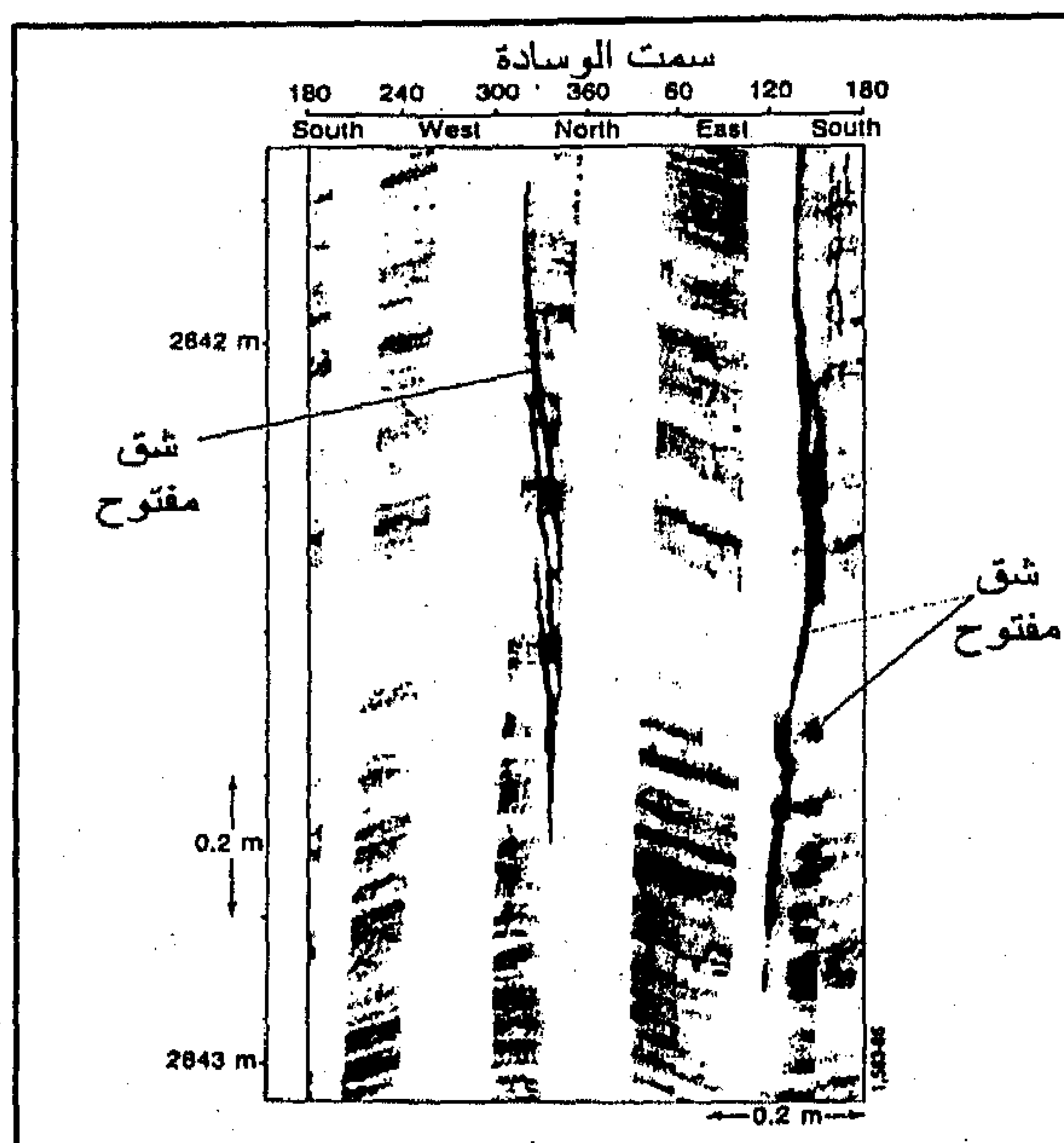
شكل ١٨-٣٣: الماسح الطبقي الدقيق وترتيب أزرار التسجيل.

وتوضح البيانات المستخلصة من FMS صوراً لطبقات الصخور الرسوبية بما في ذلك الطبقات الرفيعة السمك كما يمكن تحديد خطوط المضرب وميول الطبقات والشقوق (سواء الطبيعية منها أو المستحدثة جراء عملية الحفر)، ويعتبر هذا الأسلوب جيداً للعرض والتداول ويفيد كثيراً في أعمال المضاهاة والدراسات الجيولوجية والخزانية، وعلى الأخص فيما يتعلق بالتفاصيل الطبقية واللاتجانسات بالإضافة إلى الظواهر غير الطبقية مثل الشقوق والصدوع والتعرجات وغيرها بشكل يتقارب كثيراً مع النتائج المستخلصة من العينات اللبية، والشكل ١٨-٣٤ عرض لتسجيل FMS يظهر الشقوق المفتوحة داخل البئر.

- **السجلات المعالجة بالكمبيوتر:**

السجلات المعالجة بالكمبيوتر computer – processed logs هو أسلوب آخر من أساليب عرض البيانات والاستفادة منها اعتماداً على كفاءة الحاسوب (الكمبيوتر) ودون اللجوء إلى الحسابات اليدوية المضنية والتي تستهلك الكثير من الوقت وقد تتعرض إلى الأخطاء البشرية، وتعتمد هذه التقنية على استخدام وتزويج البيانات الواردة من سجلين أو أكثر وإدخالها إلى الحاسب الآلي وفق برمجية معينة بهدف تحديد الخصائص البتروفيزيائية للصخور مثل المسامية والتشبع بالماء والهيدروكربونات المتحركة والمتبقية residual

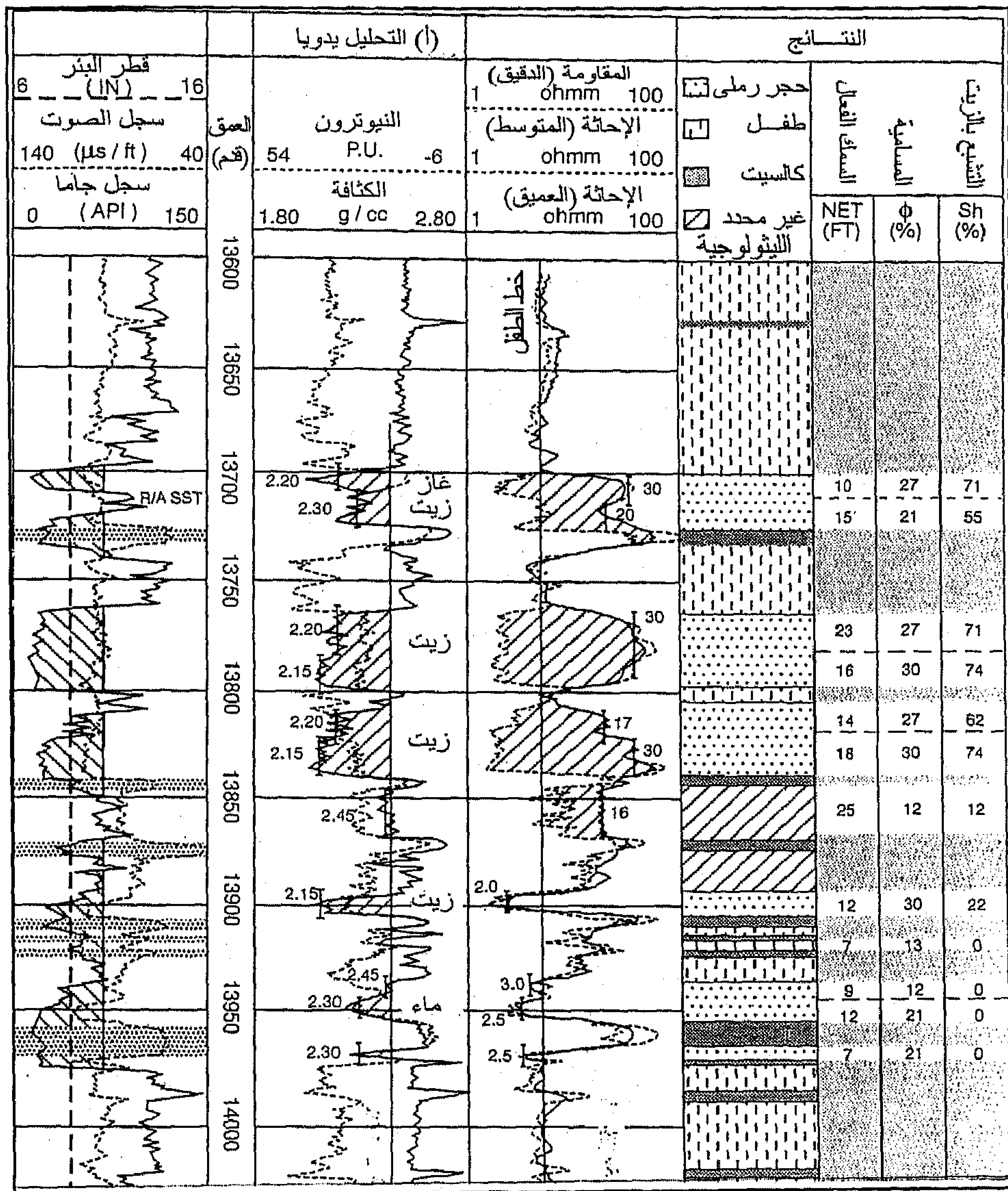
والنسب الصخرية ومحتوى الطفل وخلافه، وفي الأصل كان تحليل البيانات يتم يدوياً manually وهو عمل كما ذكرنا مضن للغاية كما هو موضح بالشكل ١٨-٣٥ أ، ولكن تطور العمل بتقديم برمجيات مبسطة استهدفت الحصول على نتائج سريعة لتحديد وتقييم الطبقات الواعدة ودون الدخول في الكثير من التفاصيل، وفي الحالتين يسمى الناتج سجل النظرة السريعة quick look log.



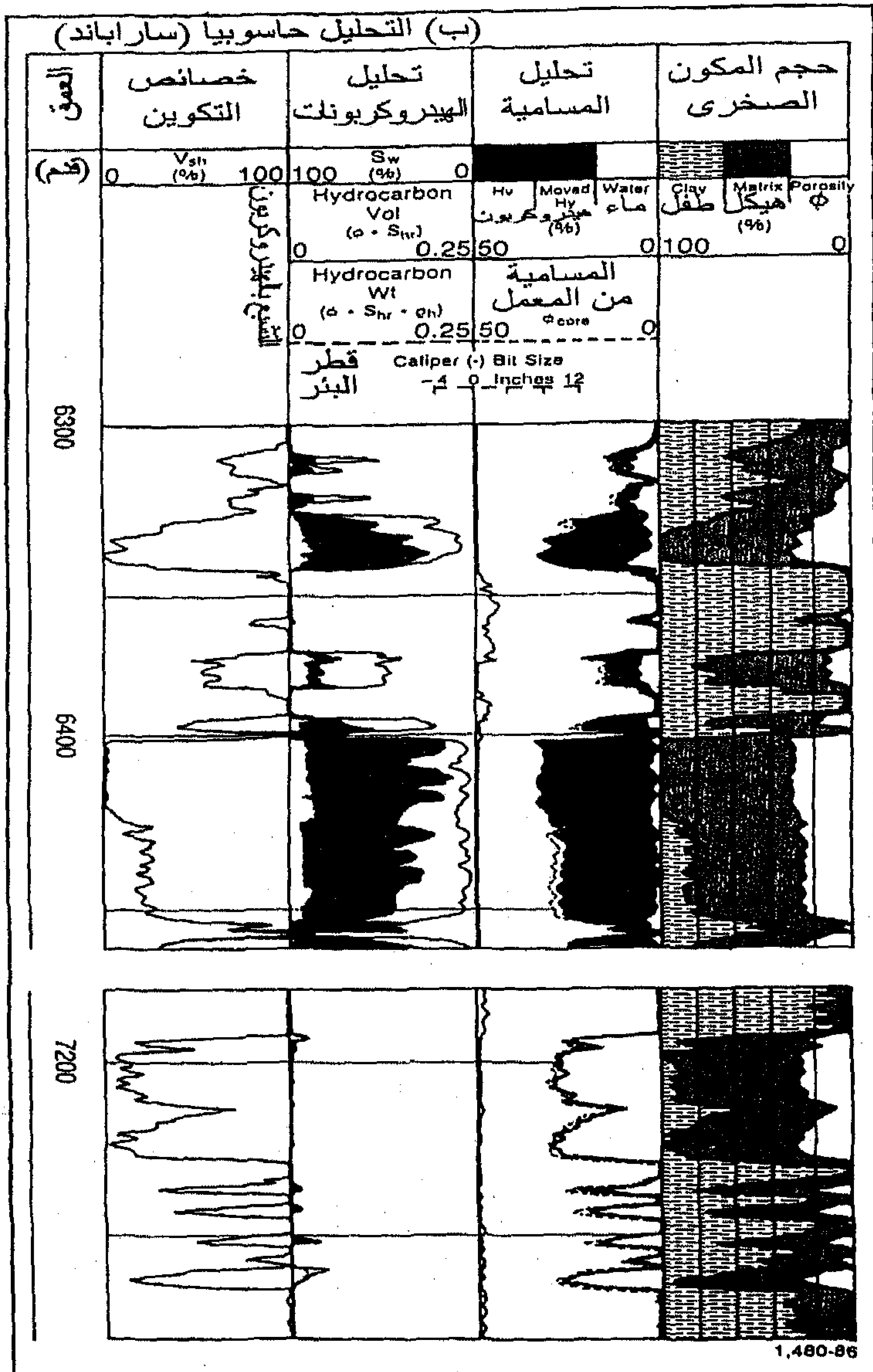
شكل ١٨-٣٤: إظهار لبيانات الماسح الطبقي الدقيق وتوضيح الشقوق بالتكوينات الصخرية.

ومن أمثلة البرمجيات السريعة سايبرلوك Cyberlook والذي أثبت فاعليته بقدر كبير، لكن مع ذلك لا يكتفى بنتائجه بصور نهائية حيث تقوم الشركات المعنية باستخدام برمجيات أكثر تعقيداً وتفصيلاً وتعرف السجلات في هذه الحالة بسجلات مركز الحاسوب computer centre logs التي تعتمد على بيانات ومعلومات أكثر دقة ووثوقية ومن ثم جاء استخدام نتائجها على الأغلب، ومن هذه البرمجيات ساراباند Saraband وجلوبال Global وإيلان Elan وألترا Ultra وبتروفيزيك Petrophysics وغيرها، ويبين الشكل ١٨-٣٥ ب مثالاً لنتائج الحاسوب والتي تتمثل أساساً في تحديد الطبقات وتحليلها ليثولوجياً ومعرفة مساميتها وكذا تشبعها بالماء والهيدروكربون والموائع الأخرى، كل

ذلك دون الحاجة إلى عملية التفسير اليدوية المضنية. ومن هذين الشكلين أ، ب يلاحظ أنه بينما كان تفسير التسجيلات يدوياً قاصراً على اختيار مسافات معينة فإن التفسير عن طريق الحاسوب كان متواصلاً ومغطياً لجميع الطبقات ذات الاهتمام وغيرها مما يعطي صورة كاملة للتكوينات التحتسطحية التي مرت بها البئر وفي ذلك فائدة كبيرة للتأويل الكيفي والكمي على حد سواء.



شكل ١٨-٣٥أ: نموذج لتحليل بيانات سجلات الآبار يدوياً لتحديد الخصائص البتروفيزيائية للخزانات الجوفية.

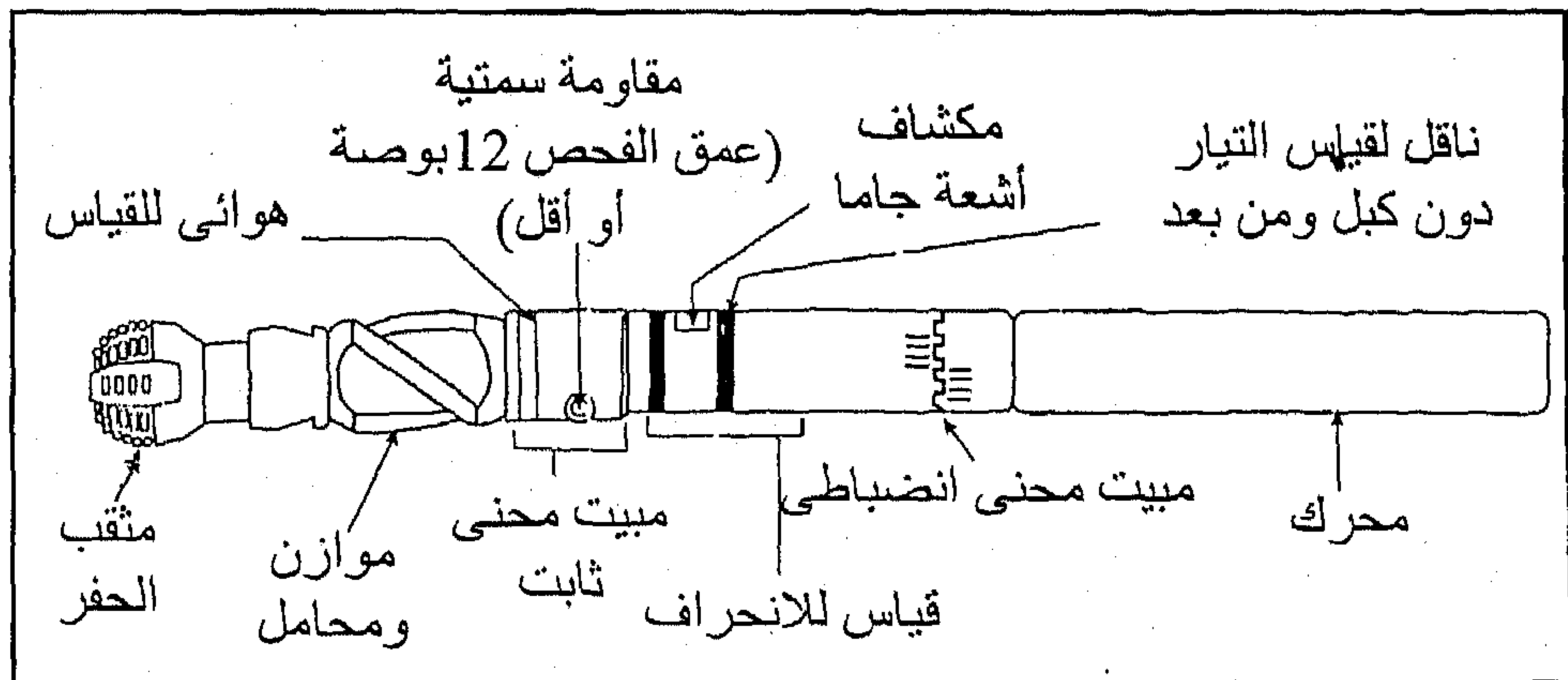


شكل ١٨-٣٥ب: تحليل بيانات تسجيلات الآبار بواسطة الحاسوب لتعيين الخصائص البتروفيزيائية للخزانات الجوفية.

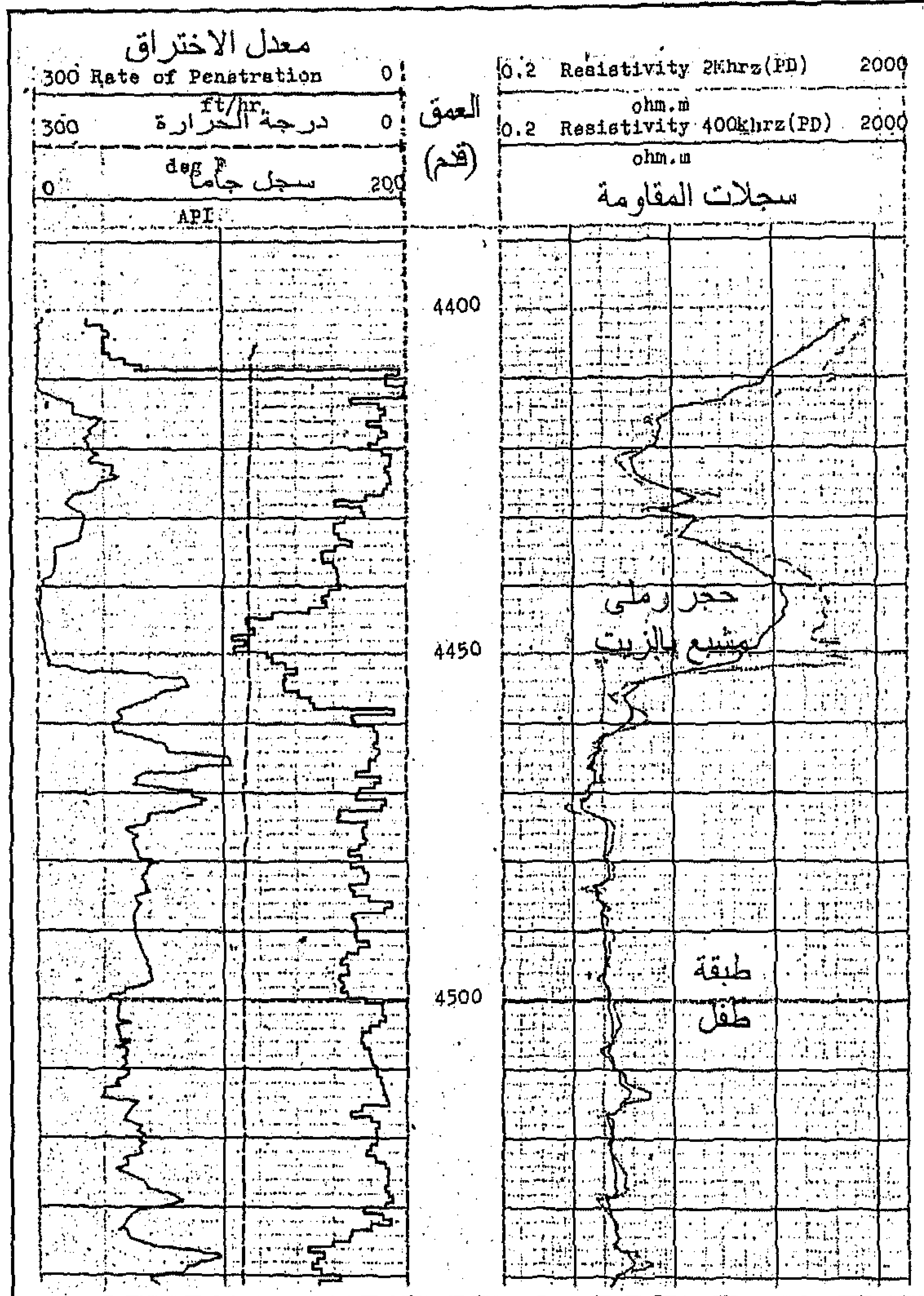
- **التسجيلات أثناء الحفر:**

كما عرفنا من قبل تجرى مجموعة التسجيلات السلكية في أغلبها بعد الانتهاء من حفر البئر، ولكنه في ثمانينيات القرن الماضي وبعد انتشار حفر الآبار المائلة والشديدة الميل جاءت

فكرة إمكانية إجراء هذه التسجيلات أثناء عملية الحفر وفي وقت حقيقي real time، وبالفعل أمكن تحقيق ذلك باستخدام أجهزة إحساس (محاسيس) sensors توضع أعلى مثقب الحفر وحيث يتم نقل البيانات في حينه إلى السطح، وقد شملت هذه البيانات الخصائص التي تتعلق باتجاه azimuth وانحراف البئر well deviation وعرفت هذه العملية بالقياسات أثناء الحفر measurements while drilling (MWD) أما تلك القياسات التي تتعلق بالخصائص الصخرية والموائع مثل المقاومة الكهربائية وأشعة جاما والكثافة والمسامية فتسمى التسجيلات أثناء الحفر logging while drilling (LWD) وتستمد أجهزة الإحساس الطاقة المحركة لها عن طريق توربين يعمل بواسطة سائل الحفرأوبطاريات كهربائية مزودة لهذا الغرض، ويتم نقل البيانات بأسلوب القياس عن بعد telemetry بواسطة إشارات نبضية تسري عبر سائل الحفر إلى أن تصل إلى السطح حيث يتم تسجيلها هناك وتفك رموزها بواسطة الحاسب الآلي، ويوضح الشكل ١٨-٣٦ مقطعاً في أحد أجهزة القياس والتسجيل أثناء الحفر وتتضمن المعدات الاتجاهية ومسابير أشعة جاما والمقاومة الكهربائية. هذا ويطلق على مجموعة القياسات والتسجيلات أثناء الحفر بما فيها أجهزة التوجيه داخل البئر "التوجيه الجيولوجي" geosteering وعلى الأخص في الآبار الأفقية وحيث يكون الهدف منها استمرار الحفر داخل الطبقة البترولية دون تجاوزها إلى الخارج، حيث قد يكون سمك هذه الطبقة محدوداً للغاية، ويوضح الشكل ١٨-٣٧ جزءاً من تسجيل أثناء الحفر في إحدى الآبار المائلة بخليج السويس ويتضمن منحنيات أشعة جاما والحرارة ومعدل الاختراق والمقاومة الكهربائية السمنتية وحيث تبدو الطبقة A حاملة للزيت وتليها طبقة من الطفل المتماسك.



شكل ١٨-٣٦: رسم تخطيطي لمكونات جهاز التوجيه الجيولوجي.

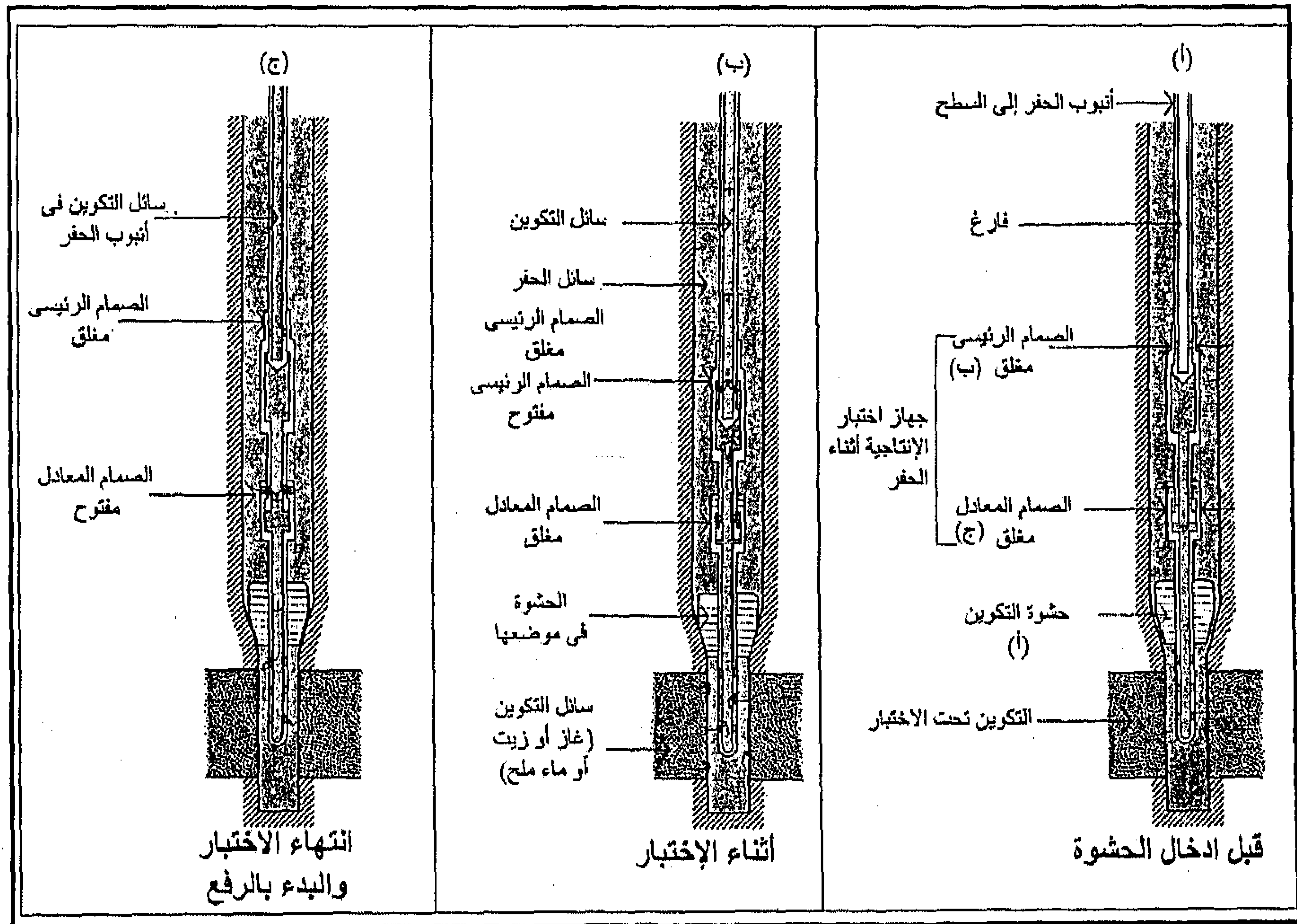


شكل ١٨-٣٧: مثال للتسجيلات أثناء الحفر في إحدى الآبار الاستكشافية بخليج السويس.

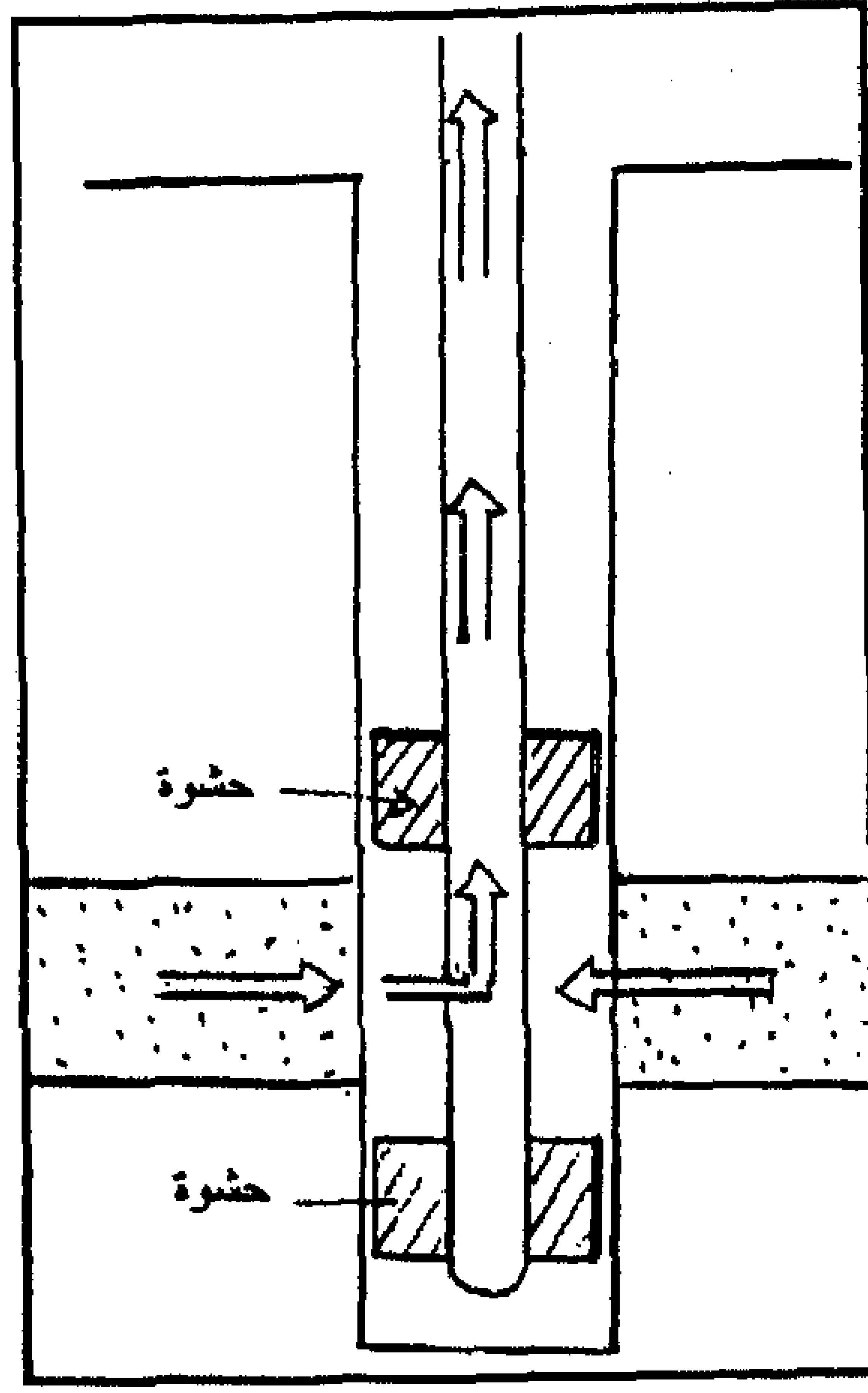
اختبار التكوينات:

بالرغم من أن الوسائل الآنفة الذكر قد توفر دليلاً على وجود الهيدروكربون بالخزان الجوفي بل إنه يمكن عن طريقها تعيين كميات الزيت أو الغاز إلا أن أيا منها لايعطي معلومات مباشرة عن معدل إنتاج التكوين من الموائع، لذلك فإنه يمكن اختبار النُّطُق التي يمكن أن تكون منتجة فوراً عند اكتشافها ولاسيما في الآبار الاستكشافية، وتعتمد هذه الطريقة على مبدأ عزل الجزء المحتمل من البئر والذي يحتوي على الزيت أو الغاز ثم

إيجاد اتصال مباشر بين هذا الجزء والسطح، ولما كان أنبوب الحفر لا يزال قائماً بالإضافة إلى سائل الحفر الذي يواصل ضغطه على النُّطُق المنفذة مانعاً بذلك تسرب أية موائع إلى البئر فإنه يطلق على هذه الطريقة اختبار الإنتاجية أثناء الحفر drillstem testing، وتقضي الطريقة بإنزال أنبوب الحفر مع حشوة (حشية) packer وأنبوب مثقب ومقاييس للضغط وصمامات للتحكم في الغلق والفتح لسريان الموائع، والحشوة عبارة عن أسطوانة مصنوعة من مادة مطاطية يمكن لها أن تنضغط وتتمدد إلى جدران البئر لتسد النطاق المراد اختباره من البئر وتعزله، كما تمنع تسرب أي مائع داخل النطاق إلى أعلى (شكل ١٨-٣٨)، وإذا كان النطاق المعني يقع عند قعر البئر فإنه يكتفي بحشوة واحدة، أما إذا كان عند موقع وسط فيتم العزل بواسطة حشوتين straddle packers إحداهما إلى أعلى النطاق والثانية إلى أسفله (شكل ١٨-٣٩)، وعندما يتم انجاز العزل فإن الموائع تبدأ في الإنسياب من داخل الخزان إلى البئر وعندئذ يفتح الصمام الذي يسمح بتدفق السوائل إلى أنبوب الحفر، وإذا كان هذا السائل غازاً فإنه ينطلق إلى أعلى البئر حيث يتم قياسه وإشعاله للتخلص منه، وأحياناً يمكن للزيت أن ينطلق أيضاً من الخزان ليصل إلى السطح إلا أنه في العادة لا يملأ غير جانب من الأنبوب يمكن تقديره.



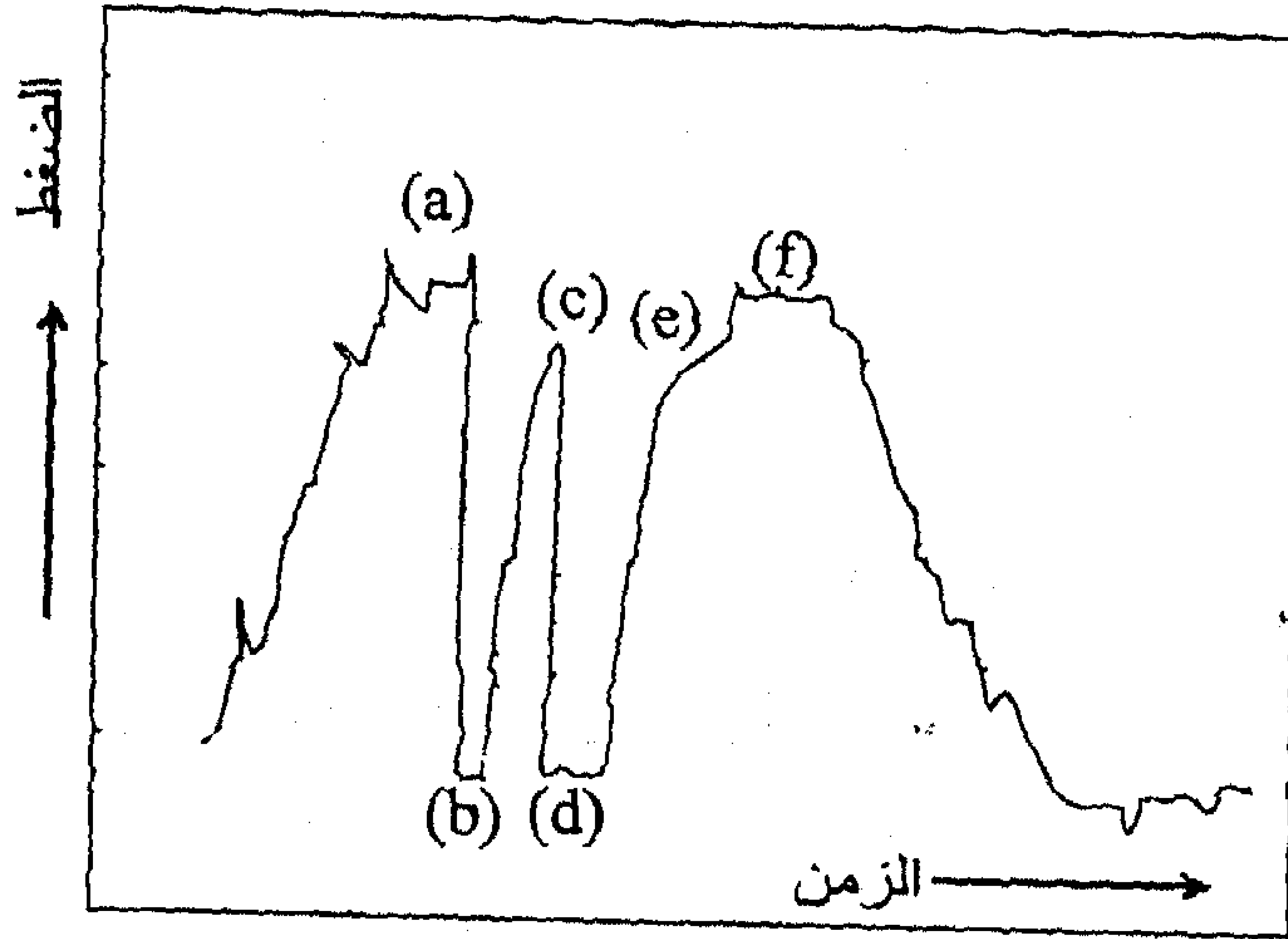
شكل ١٨-٣٨: كيفية اختبار إنتاجية التكوين أثناء الحفر باستخدام حشوة واحدة



شكل ١٨-٣٩: اختبار إنتاجية البئر باستخدام حشوتين.

وأثناء عملية الاختبار يقاس الضغط على الموائع المتدفقة خلال فترات زمنية متعددة ومنتظمة حيث يغلق ويفتح الصمام الموجود على الأنبوب لمرات عديدة، وفي كل مرة تسجل قيمة ضغط البناء build-up pressure وكذلك ضغط الهبوط (drop-off) drawdown pressure على شكل منحنى يعرف بمنحنى الضغط (شكل ١٨-٤٠) حيث يستفاد من هذا المنحنى في حساب نفاذية التكوين وضغط الموائع ومقدار ما قد يكون أصاب الخزان من ضرر أو أذى formation damage، وقد يستغرق الاختبار عدة دقائق (٢٠ دقيقة) وربما يصل إلى ثلاثة أيام، وبالطبع فإذا كان أمد الاختبار طويلاً كانت البيانات أكثر دقة ولكن ذلك سيكون على حساب تكلفة البئر والعائد المادي. وبعد إنجاز الاختبار يسد أنبوب الحفر في قعر البئر بإغلاق الصمام الرئيس ويسمح لسائل الحفر القادم من الحيز الحلقي annulus في أنبوب الحفر بالدخول إلى ما دون الحشوة عن طريق صمام آخر، ثم يمكن فصل الحشوة وسحب المجموعة كلها من البئر، ولا يقتصر الاختبار على الآبار غير المغلفة ولكن يمكن إجراؤه كذلك في الآبار المغلفة بعد تثقيبها، ولا ينصح بإجرائه في التكوينات الرملية وغير المتماسكة حيث قد تنهار البئر وتتسبب في عطب التجهيزات الموجودة بها وربما احتجازها بالداخل مما قد يكلف الكثير من الجهد والمال.

ويوضح الشكل ١٨-٤٠ السجل الحقيقي لاختبار أنتج الغاز والزيت والماء مع تزايد الزمن من اليسار إلى اليمين وتمثل (a) قيمة الضغط الابتدائي لسائل الحفر initial mud pressure، (b) ضغط التدفق الأولي preflow pressure (لمدة ٥ دقائق مثلاً)، (c) ضغط الإغلاق الابتدائي initial shut-in (لمدة ٩٠ دقيقة مثلاً)، (d) ضغط التدفق النهائي final flow pressure (لمدة ٦٠ دقيقة)، (e) ضغط الإغلاق النهائي final shut-in، (f) الضغط النهائي لسائل الحفر final mud pressure.



شكل ١٨-٤٠: منحنى الضغط مقابل الزمن عند اختبار الآبار.

(a): الضغط الإستاتيكي الابتدائي. **(d): التدفق النهائي.**

(b): التدفق الابتدائي. **(e): الغلق النهائي.**

(c): الغلق الابتدائي. **(f): الضغط الهيدروستاتيكي النهائي.**

منحنيات هورنر:

عند الحديث عن اختبارات الآبار يكون تحليل البيانات التي تم الحصول عليها أثناء الاختبار أمراً ضرورياً لتحديد الخصائص الخزانية للطبقة المنتجة ويكون التعامل مع منحنيات هورنر Horner plots - والتي ترسم العلاقة بين ضغط الخزان والزمن - ذا أهمية كبيرة في دراسة الخزانات الجوفية ويتمثل ذلك في المعادلة الرياضية الآتية:

$$P_{ws} = P_i - 162.6\, q\mu\, B/Kh\, [\log (t+\Delta t) / \Delta t]$$

حيث إن:

P_{ws} = ضغط الإغلاق مقدراً بالرطل على البوصة المربعة.

P_i = الضغط الابتدائي للخزان (رطل / بوصة[٢]).

q = معدل الإنتاجية (برميل/ يوم).

μ = لزوجة المائع (سنتي بُواز).

B أو FVF = المعامل الحجمي للتكوين.

K = نفاذية الخزان (ملي دارسي).

h = السمك الفعال والمغل للخزان (قدم).

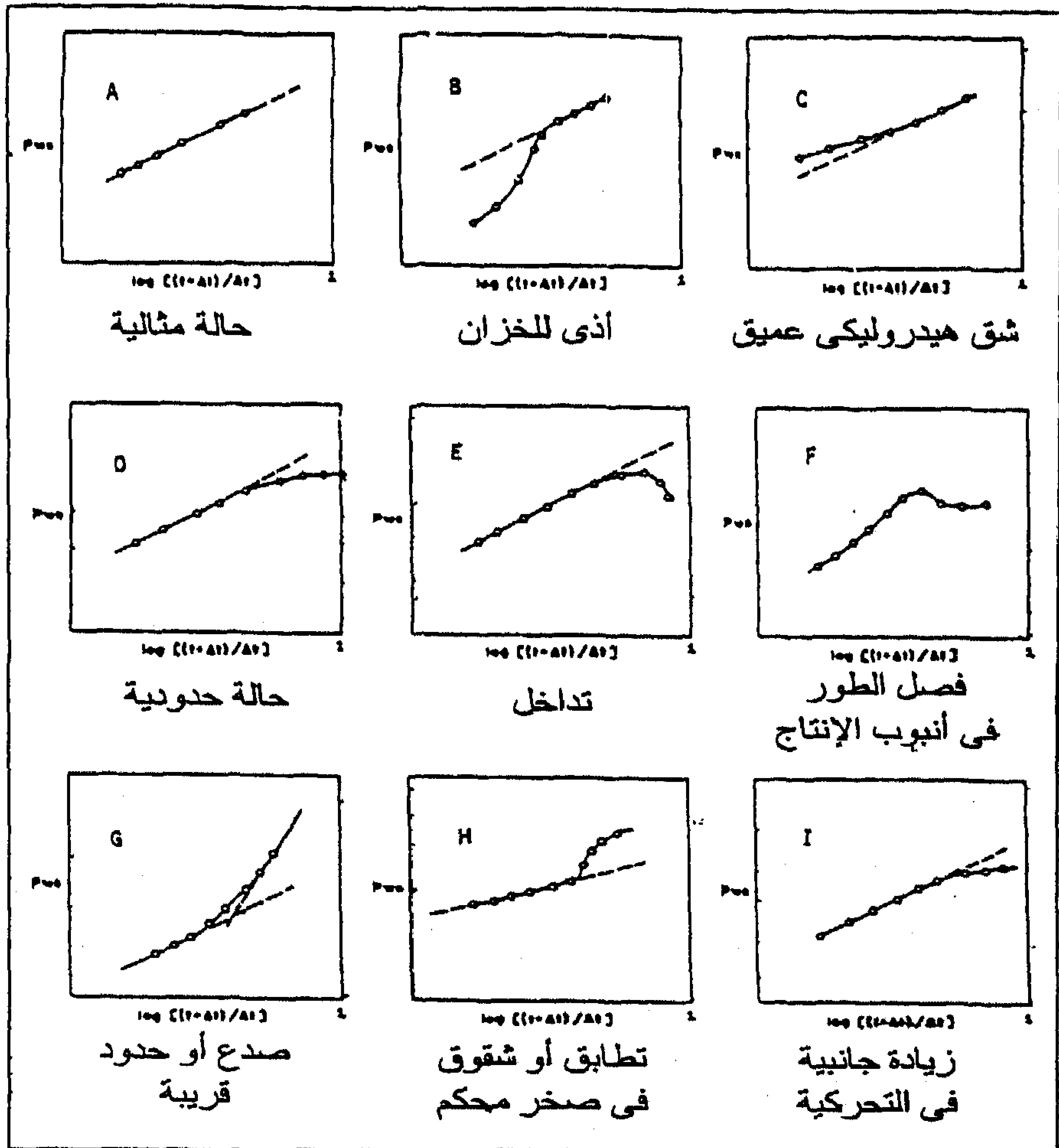
t = زمن الإنتاج (ساعة).

Δt = زمن الإغلاق (ساعة).

وهي معادلة خط مستقيم $(y = mx + b)$ ويكون فيها $y = P_{ws}$، $m = 162.6\ q\mu$ B/Kh و $b = P_i$، $x = \log[(t+\Delta t)/\Delta t]$، وإذا ما رسمت العلاقة بين ضغط الخزان والزمن على ورق نصف لوغاريتمي يكون ميل الخط هو $m = 162.6\ q\mu$ B/Kh، وباستكمال ومد هذا الخط حتى ١ من الشكل نصل إلى قيمة زائفة false للضغط P^* وهي قيمة تكون في الواقع قريبة للغاية من القيمة الحقيقية للضغط $(P^* = Pi)$ في حالة الخزانات غير المحدودة infinite reservoirs.

ولا تقتصر أهمية منحنيات هورنر على تعيين النفاذية الفعالة للخزان إضافة إلى ضغطه الابتدائي، ولكن ما يحدث من انحراف لتلك المنحنيات عن الخط المستقيم يعني أن ثمة ظروفاً قد طرأت وأثرت على أداء الخزان المنتج واحتمال إصابته بضرر، وعادة لا تحتاج منحنيات هورنر إلى جهد كبير في تفسيرها باستثناء حالات قليلة، وللتوضيح نتطرق إلى الحالات التالية والواردة بالشكل ١٨-٤١.

- الحالة A هي مثال نموذجي لخزان غير محدود وتشير إلى أن قيمة الضغط تتزايد مع مرور الوقت دون وجود قيودات أو تأثيرات بئرية وأن المنحنى ممثل بخط مستقيم.



شكل ١٨-٤١ : منحنيات هورنر عند حالات مختلفة.

- الحالة B تمثل تعرض الخزان لضرر أحدثته عوامل بثرية مثل تراكم قشرة الطين على جدار البئر أو لأحداث أخرى تتعلق بعملية التثقيب وانسداد الثقوب أو ترسب البارافينات أو لتأثيرات أخرى ذات طبيعة جيولوجية أو ميكانيكية، وإذا كان معامل الضرر موجباً positive skin فهذا يرجع إلى قيودات وإعاقات داخل البئر أو بالمنطقة المتاخمة، أما إذا كان هذا المعامل سالباً فهذا يشير إلى ظروف فوق عادية بالقرب من البئر وربما يكون ذلك راجعاً إلى الكيفية التي تم بها إكمال البئر واستخدام المعالجة بالحامض أو التكسير الهيدروليكي عند تنشيط البئر.

- الحالة C تعني أن تدفق الموائع خلال الوسط المسامي كان أفضل مما كان متوقعاً وعادة ما يكون ذلك مرتبطاً بوجود شقوق عميقة وفعالة داخل الصخر الخزان.
- الحالة D تفسر حالة خزان مقيد restricted ويكون بناء الضغط تدريجياً مع الوقت وحتى الوصول إلى حد الخزان حيث يلاحظ بعد ذلك استواء قيمة الضغط.
- الحالة E توضح تداخلاً interference من بئر أو عدة آبار إنتاجية قريبة من البئر تحت الاختبار.
- الحالة F تشير إلى تدفق الزيت إلى داخل البئر واكتمال بناء الضغط إلى حده الأقصى، وإذا كان ضغط الخزان أقل من ضغط التشبع فسوف يتحرر الغاز من الزيت وينفصل في أنبوب الإنتاج ومن ثم يلاحظ انخفاض في الضغط داخل البئر، وتحدث نفس النتيجة إذا كان هناك تسرب من التجهيزات البئرية مثل حشوات العزل أو أنبوب الإنتاج ذاته.
- الحالة G حيث يلاحظ فيها زيادة في معدل بناء الضغط مع امتداد زمن الإغلاق وقد يكون ذلك راجعاً إلى وجود صدع مجاور أو طبقة متاخمة ويمكن حساب المسافة بين الصدع أو هذه الطبقة عن طريق معرفة قيمة Δt عند تقاطع الخطين المستقيمين لمنحنى هورنر كما هو مبين.
- الحالة H تمثل نظاماً ذا نفاذيتين متباينتين وبسبب النفاذية العالية (أو وجود الشقوق) يظهر الخط المستقيم من المنحنى مبكراً ومع مرور الوقت يبدأ ببطء تأثير المسامية الضعيفة على قيم الضغط.
- الحالة I توضح حالة تزداد فيها نفاذية الطبقة كلما بعدنا عن موقع البئر، وعليه يكون بناء الضغط ببطء بالقرب من البئر ليتدرج في زيادة مطردة كلما اقتربنا من المنطقة ذات النفاذية الأعلى. وبالطبع فإن تحليل الاختبارات البئرية ليس بالأمر الهين ولمزيد من المعرفة يمكن الرجوع إلى المراجع والدراسات المتخصصة.

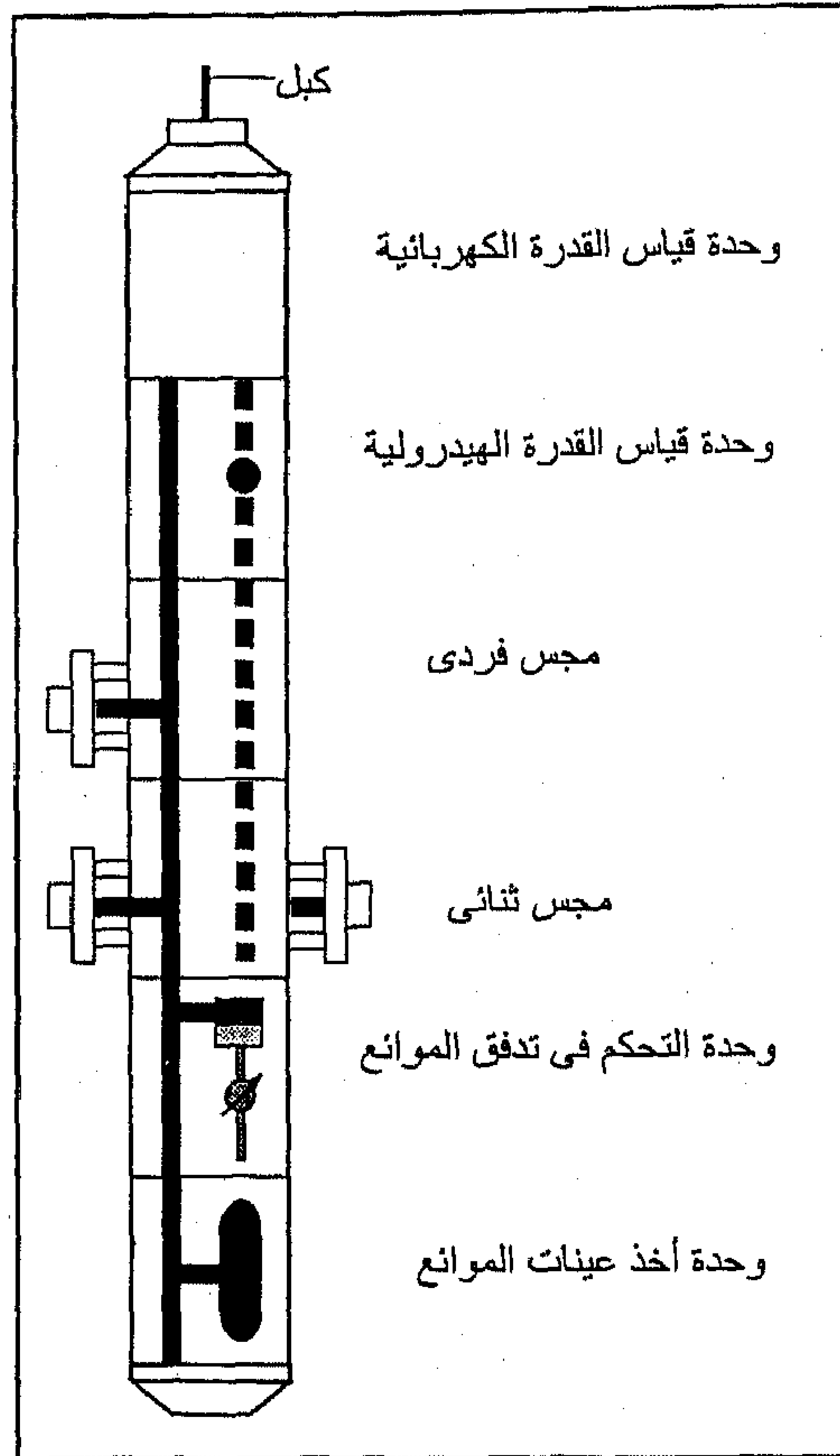
قياسات الضغط وأخذ عينات الموائع:

بجانب ماسبق من شروح للوسائل المستخدمة في تقييم التكوينات يدخل ضمن برنامج التقييم أيضاً إجراء قياسات للضغط pressure measurements وأخذ عينات

من الموائع fluid samples التي يحتوي عليها الخزان الجوفي من زيت وغاز أو ماء، وهي معرفة ضرورية ليس فقط بالنسبة لمرحلة الاستكشاف بل أيضا لمرحلة تنمية وإنتاج الحقول.

وكإحدى طرائق التقييم ما يعرف بالاختبار السلكي للتكوين wireline formation testing والمستخدمة في الآبار غير المغلفة والذي يعتمد على أجهزة خاصة تدلى بالبئر أمام نقاط مختارة داخل الخزان الجوفي حيث تسجل قراءات الضغط وكذا إمكانية الحصول على عينات من السوائل الموجودة عند تلك النقطة أو غيرها إذا ما لزم الأمر ذلك بواسطة حجرات chambers أسطوانية خاصة ذات سعات ما بين ٥-٥٠ لتراً ويمكن للجهاز العمل تحت ضغوط بئرية تصل إلى ٢٠ ألف رطل/ بوصة مربعة ودرجة حرارة ٣٥٠ فهرنهيت، ومن بين هذه الأجهزة المختبر المتكرر للتكوين repeat formation tester (RFT) وكذا المختبر المتعدد للتكوين formation multitester (FMT) وأيضاً النسخة المعدلة منهما والذي يسمى المختبر الديناميكي المعياري modular dynamic tester، وبواسطة هذه المختبرات يمكن أخذ قراءات للضغط وكذا قطف عينات سائلة، إلا أن المختبر الديناميكي هو أحدثها وأكثرها تطوراً (شكل ١٨-٤٢)، وعند اجراء الاختبار يوجه الجهاز إلى النقطة المنتقاة من التكوين الجوفي داخل البئر وذلك بمساعدة حشوتين packers أو ثلاثة مجسات probes، ويتم دفع هذه المجسات إلى قشرة الطين المتكونة على جدار البئر أمام الطبقة المسامية حتى تصبح المسابير في مقابلة التكوين الصخري وعند أحد المجسات الثلاثة يتم إحداث فرق بين ضغط البئر وضغط الخزان الجوفي وهو ما يعرف بسحب أو هبوط الضغط pressure drawdown (ΔP_{DD}) مع ملاحظة ما يحدث في المجسين الآخرين من هذا الفارق في الضغط، وبمعرفة ذلك يمكن الحصول على قيمة تقديرية للنفاذية الرأسية والأفقية وبالتالي معرفة مدى تجانس الخزان الجوفي، وإضافة إلى ذلك فإنه يمكن أخذ عينة للموائع الموجودة بداخل الخزان، وفي هذا الشأن فقد زود هذا المختبر بجهاز لقياس المقاومة الكهربائية للموائع الواردة حيث يمكن ملاحظة ذلك من خلال الانخفاض أو الارتفاع في قيمة المقاومة على جهاز المراقبة، فإذا كان المائع ماء مالحاً تكون قيمة المقاومة منخفضة، أما إذا كان زيتاً أو غازاً ارتفعت المقاومة، وهذا الأسلوب في التسجيل لم يكن موجوداً في النسخة السابقة (RFT) من الجهاز، مما كان يكشف في عدد غير قليل من الحالات عن

وجود موائع داخل حجرات التجميع تكون في أغلبها عبارة عن راشح الطين ولا تمثل التشبع الحقيقي بالخزان وعلى ضوء ذلك كانت تُتَّخذ قرارات غير صائبة.



شكل ١٨-٤٢: رسم تخطيطي للمختبر الديناميكي للآبار.

وفي بعض الحالات عندما يكون سائل الحفر قد اجتاح نطاقاً ذا نفاذية ضئيلة للغاية فإن توازن الضغط قد يستغرق وقتاً طويلاً، ويكون الضغط الذي يسجله المسبار قريباً من ضغط سائل الحفر وأعلى كثيراً من الضغط الحقيقي للخزان، وتسمى هذه الظاهرة الشحن الزائد supercharging، وتدل هذه الضغوط غير العادية على أن التكوين الصخري عند هذه النقطة محكم tight ، وبناءاً على ذلك فإنه لا يمكن استخدام هذه النقطة (أو النقاط) في إيجاد التدرج الحقيقي لضغط الموائع وينبغي استبعادها من بقية النقاط الموقعة، ومن ناحية أخرى فإن انخفاض قيمة الضغط عن الضغط الأصلي للخزان بشكل ملحوظ قد يعني أن نضوباً depletion قد حدث للخزان المنتج، ومن ثم وجب أخذ ذلك في الاعتبار.

وإذا ما وُقِّعت قيم الضغط المقاسة مقابل العمق (وعادة ما يكون منسوباً لسطح البحر) فإن تدرج الضغط للغاز سوف يختلف عنه في الزيت عنه في الماء. وتتراوح قيم تدرج الغاز gas gradient بين ٠،٢٦ و٠،٠٥ رطل على البوصة المربعةpsi/متر (٠،٠٨ - ٠،١٦ رطل على البوصة المربعة psi/ قدم) وتدرج الزيت بين ٠،٨٢ و١،١٥ رطل على البوصة المربعة/ متر (٠،٢٥ - ٠،٣٥ رطل على البوصة المربعة/ قدم) وتدرج الماء بين ١،٥٧ و١،٨٠ رطل على البوصة المربعة/ متر (٠،٤٨ - ٠،٥٥ رطل على البوصة المربعة/ قدم) ولتحويل قيمة التدرج إلى الكثافة تستخدم المعادلة الآتية:

كثافة المائع (جم / سم^{٣}) = { تدرج الضغط (رطل على البوصة المربعة/ متر)/ (١،٤٢٢)}.

ويبين الشكل ١٨-٤٣ مثالاً لقياسات الضغط RFT في إحدى آبار حقل مزاب M'zab بالجزائر ونلاحظ تغيراً كبيراً في قيمة تدرج الضغط في الجزء العلوي من الخزان الجوفي حيث تبلغ كثافة الوسط ٠،٢٥جم/ سم^{٣} وهو ما يعني وجود الغاز هناك، أما الجزء السفلي من الخزان فتبلغ كثافته ١،١٧ جم/ سم^{٣} حيث يتواجد ماء شديد الملوحة في هذا الجزء ويكون السطح الفاصل بين الغاز والماء (الغاماء) عند عمق ٢٢٢٣ متراً تحت سطح البحر.

وعند التعامل مع قراءات الضغط ينبغي أن نأخذ في الاعتبار أن التغيرات الفجائية في تدرج الضغط قد تعني عدم استقرار في القراءات، أما التغيرات التدريجية فقد تكون بسبب هبوط في مستوى سائل الحفر بالبئر أو إلى حدوث انفصال في مكونات سائل الحفر واتجاه أجزائها الثقيلة للاستقرار في قعر البئر.

ومن الأمثلة التي تؤكد أهمية استخدام RFT في تقييم التكوينات تلك القياسات التي أجريت في منطقة حقل بدر-٣ بالصحراء الغربية في مصر والتي أسهمت في الكشف عن حافة للزيت oil rim أسفل تجمع كبير للغاز في تكوين الحجر الرملي "خريطة" من العصر الكريتاوي، ولم يكن بالإمكان تحديد هذه الحافة واحتمال تواجدها هناك إلا من خلال منحنيات تدرج الضغط في الآبار التي تم حفرها بالمنطقة والتي تحدد سمك هذه الطبقة بنحو ٣٥ متراً (١١٥ قدماً) بين تماس الزيغاز والزيماء وذلك من واقع قياسات الضغوط في الآبار

هناك (شكل ١٨-٤٤)، هذا وسوف نتناول ذلك الأمر بقدر من التفصيل في الفصل الأخير من هذا الكتاب، وقدر الاحتياطي البترولي في هذه الحافة بحوالي ٥٠ مليون برميل.



شكل ١٨-٤٣: قياسات الضغط داخل بئر مزاب بالجزائر



شكل ١٨-٤٤: منحنيات التدرج في ضغط الخزان بآبار بدر - ٣ بالصحراء الغربية بمصر.

وتجدر الإشارة إلى أن قياسات RFT التي ذكرناها للتو كان يتم إجراؤها في الآبار غير المغلفة إلا أنه أمكن في الآونة الأخيرة إجراء قياسات للضغوط في الآبار المغلفة cased holes وذلك بعد استبدال المجسات والحشوات بمدفع ذي طلقتين لتثقيب النقطة المراد اختبارها داخل البئر وبواقع نقطتي قياس للضغط وأخذ عينتين للموائع من داخل الخزان الجوفي في الرحلة الواحدة يتم بعدها رفع الجهاز إلى خارج البئر، وإذا ما تطلب الأمر المزيد من الاختبارات أمام نقاط جديدة يعاد شحن المدفع وإنزاله مرة أخرى وهكذا.

وبجانب التسجيلات في الآبار غير المغلفة والتي فرغنا للتو من تناولها هناك عدد آخر من التسجيلات المخصصة للآبار المغلفة cased hole logs والتي تعنى أساساً بمراقبة ودراسة الخزانات المنتجة وما قد يطرأ عليها من تغير في خصائصها أثناء الإنتاج وسوف نقدم شرحاً لها عند الحاجة إلى ذلك.

الفصل التاسع عشر

إكمال الآبار والرفع الاصطناعي

بعد الانتهاء من حفر البئر وإجراء الاختبارات التي تناولناها في الفصل السابق هناك أحد أمرين: الأمر الأول هو أن البئر التي حفرت كانت خاوية (جافة) وبالتالي ينبغي سدها بالأسمنت وهجرها، وهذا لا يعني أنها كانت غير مجدية بل أن البئر قد أفادت في التعرف على طبيعة التكوينات الجوفية وأضافت إلى معلوماتنا الجديد وهو ما قد يترتب عليه حفر آبار جديدة بالمنطقة من عدمه، والأمر الثاني: أن البئر تحتوى على تكوين أو عدة تكوينات جيولوجية ذات إنتاجية محتملة، وفي هذه الحالة وجب إكمال وإنجاز البئر well completion بطريقة تمكننا من إنتاج ما بها من هيدروكربون (زيت أو غاز)، وتجهز طريقة الإكمال بناءً على طبيعة التكوينات الموجودة داخل البئر، وفي مجمل القول تغلف البئر بسلسلة من أنابيب التغليف تثبت بالأسمنت حتى قمة النطاق المسموح الإنتاج منه على الأقل.

وفي نمط مشابه لما شاهدناه في عملية الحفر هنا أيضاً تتعدد المكونات المتعلقة بإكمال البئر من حيث أنبوب التغليف (القيسون) والسمنتة وأنبوب الإنتاج ورأس البئر وفتحات الإنتاج والتجهيزات السطحية وأساليب الإكمال وخلافه، وهو ما سوف نستوضحه خلال هذا الفصل.

أنبوب التغليف:

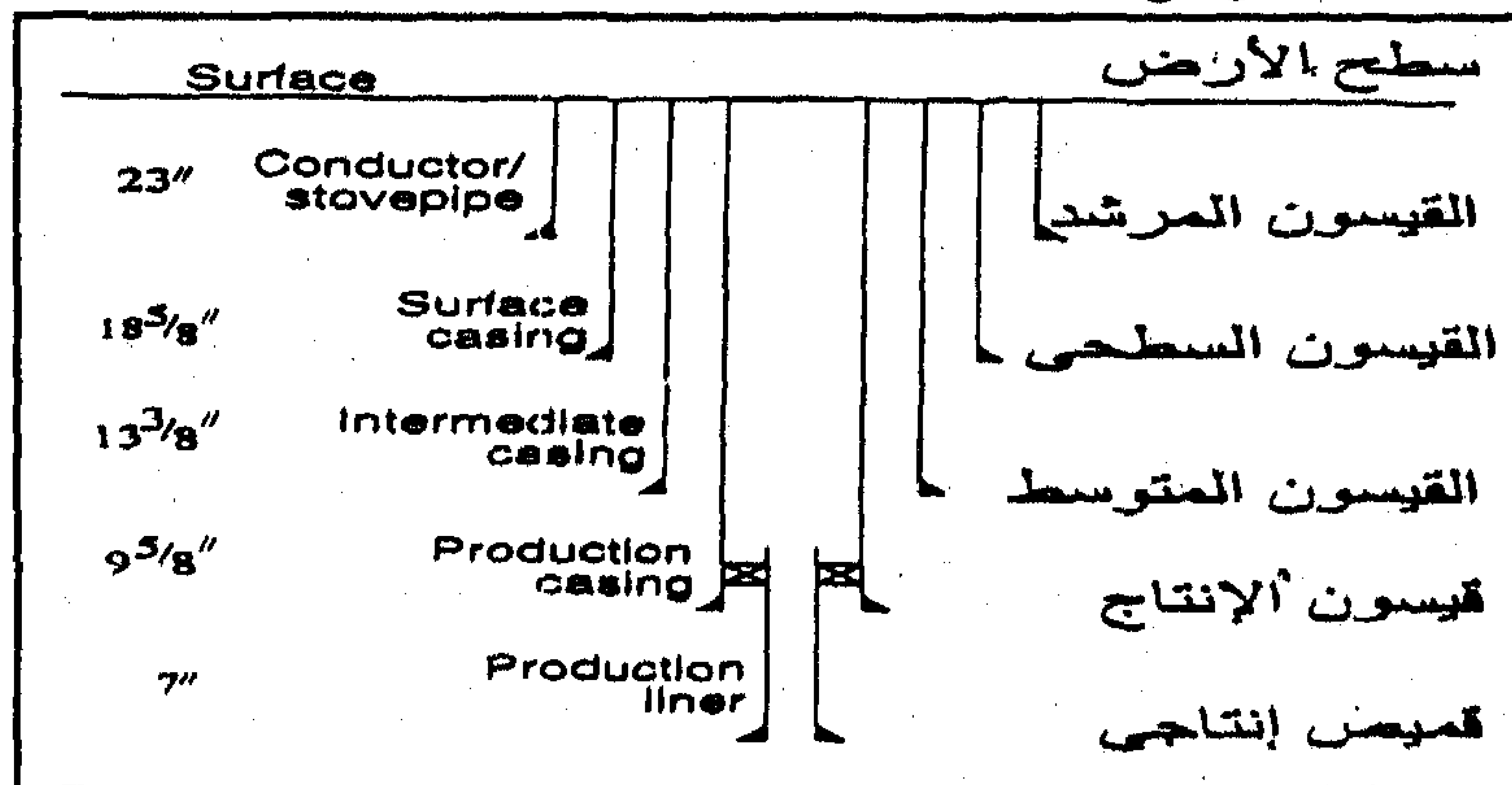
تغليف الآبار بالقيسون casing هو عمل روتيني وضروري في ذات الوقت، فبعد الانتهاء من كل مرحلة من مراحل الحفر داخل البئر الواحدة تجرى عملية تغليف للبئر بهدف استقرار حالة البئر ومنع جدرانها من الانهيار والتكهف، وأيضاً حماية خزانات المياه العذبة التي غالباً ما توجد بالقرب من سطح الأرض، وكذلك حماية الخزانات الجوفية من التلوث الذي يكون قد أصابها أثناء الحفر أو أثناء عملية الإنتاج ومنع أي تسربات للموائع من أو إلى التكوينات الجيولوجية المختلفة مما قد يتسبب في اختلاط البترول بالمياه ويؤدي إلى نتائج غير مرغوبة.

والقيسون هو أنبوب من الصلب المتجانس الخواص ومصنف حسب المعايير العالمية المعتمدة، ويتكون من وحدات تعرف بالوصلات joints يتراوح طول الواحدة منها بين خمسة أمتار (١٦ قدما) و١٣ متراً (٤٢ قدما) وعادة ما يكون طول الوصلة عشرة أمتار

(٣٠ قدما) كما يتراوح قطر الوصلة بين ١١،٥ إلى ٩١،٥ سم (٤،٥ إلى ٣٦ بوصة) وعادة ما يكون بين ١٤ إلى ٣٥ سم (٥،٥ إلى ١٣،٧٥ بوصة)، ولكل وصلة أسنان خارجية male threads يتم حمايتها بواسطة غطاء من البلاستيك أو المعدن ويتم نزعها عند البدء في استخدام الوصلة، كما توجد طوق collar وهو مقطع صغير من أنبوب أسطواني له أسنان داخلية female threads ويزيد في قطره قليلا عن أنبوب القيسون حيث يمكن بالتالي لولبة وربط الوصلات ببعضها لتكون في النهاية سلسلة أنابيب التغليف casing string.

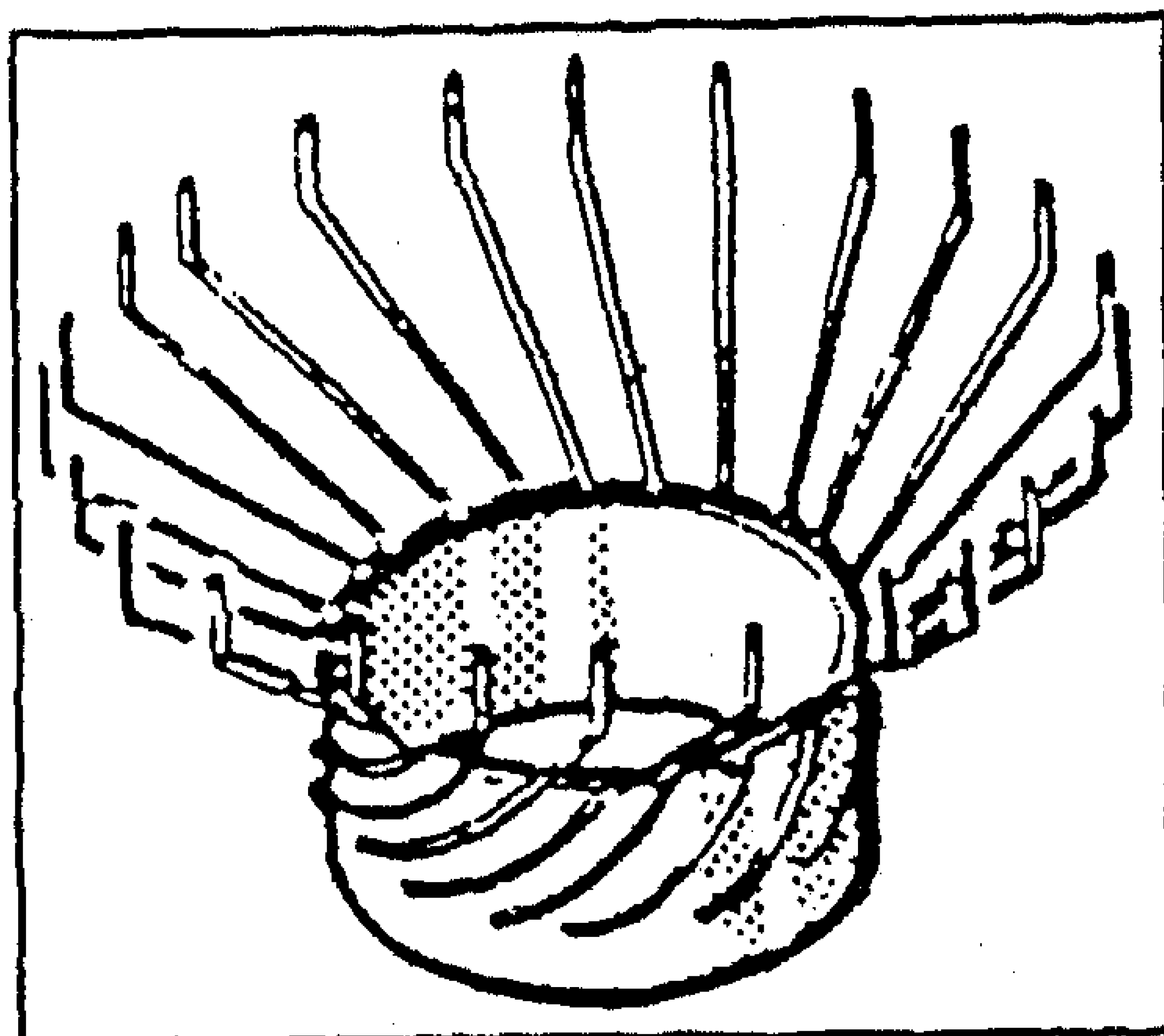
عمليات القيسنة والسمنتة:

لكل بئر برنامج للقيسون يتضمن خصائص الأنبوب من حيث الحجم والرتبة وغيرها من المواصفات اللازمة، وفي الآبار العميقة عادة ما تتم عملية الحفر على شكل تليسكوبي (شكل ١٩-١) وتكون البداية بالمثقب ذي القطر الأكبر يليه الأصغر فالأصغر، وهكذا يكون الحال بالنسبة لأنبوب القيسون، فالجزء العلوي من القيسون surface casing ذو القطر ٥٨ سم (٢٣ بوصة) يناسبه قيسون ذو قطر ٤٧ سم (١٨،٦٢٥ بوصة) ويسمي القيسون السطحي surface casing يليه القيسون المتوسط intermediate (protection) casing قطر ٣٤ سم (١٣،٣٧٥بوصة)، يليه قيسون الإنتاج production casing بقطر ٢٤سم (٩،٦٢٥بوصة)، ويمكن أن يكون هناك قيسون أصغر حجماً liner بقطر ١٨ سم (٧ بوصات)، ويثبت هذا القيسون في الأنبوب الذي يعلوه مباشرة، ويقتصر وجوده على الجزء السفلي من البئر ولا يمتد حتى السطح بهدف تحقيق وفرة في التكلفة، وقبل البدء في عملية السمنتة تتم تهيئة البئر وذلك عن طريق إنزال سلسلة أنابيب وبنهايتها المثقب ويضخ سائل الحفر لفترة زمنية تجري خلالها عملية "حفر" سريعة لتنظيف البئر من أية حُفارات مختلفة.



شكل ١٩-١: مخطط القيسنة.

ولإزالة قشرة الطين من جدار البئر تستخدم مكاشط scratchers ذات أسلاك ناتئة من الصلب (شكل ١٩-٢) وتثبت بواسطة أطواق أو قامطات clamps على أنبوب القيسون ويتم تحريكها صعوداً وهبوطاً داخل البئر للتخلص من تلك القشرة.

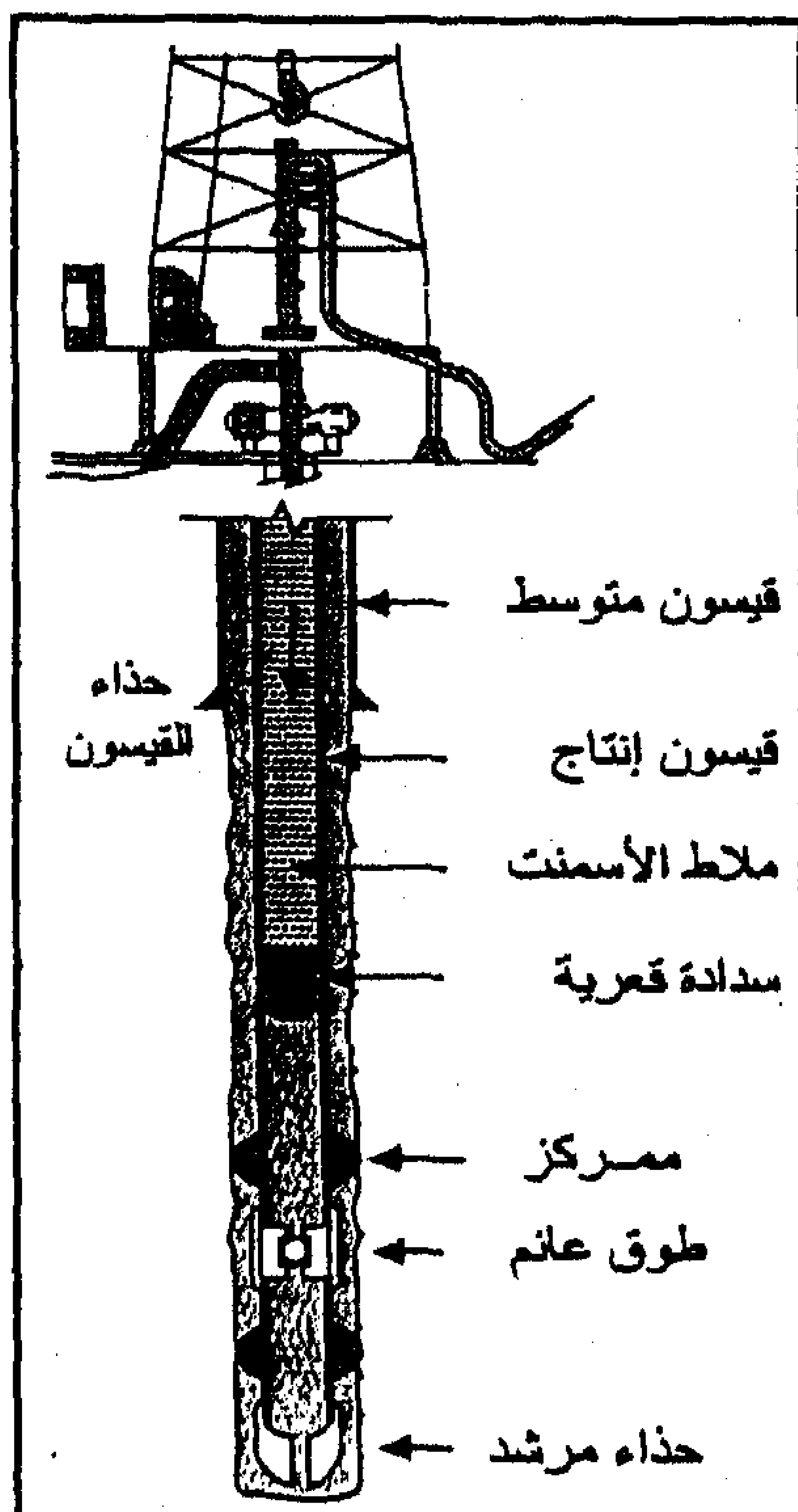


شكل ١٩-٢: مكشط لإزالة العوالق.

ولإنجاز القيسنة يتم ربط الوصلات المتوافقة على الموقع ببعضها وإنزالها إلى البئر بطريقة مشابهة للتعامل مع سلسلة أنابيب الحفر، وتحتوي الوصلتان السفليتان على أسطوانة قصيرة من المعدن ذات ثقب في نهايتها تعرف بالحذاء المرشد guide shoes ويعمل هذا المقطع على إرشاد القيسون أثناء نزوله إلى البئر، ويوجد بداخل الحذاء المرشد صمام أحادي الاتجاه ويفتح عند ضخ الأسمنت وطين الحفر إلى أسفل القيسون وانتشاره على الجوانب، وهذا الصمام ضروري لأنه عند نهاية العملية يصبح عمود ملاط الأسمنت cement slurry الذي يملأ الحيز وراء القيسون أثقل من الطين داخل الأنبوب، كذلك فهناك طوق عائم float collar يتم إدخاله في الوصلة أعلى الحذاء المرشد ويمسك بسدادتين من المطاط (سفلى وعليا) حيث يضخ الملاط بينهما، ومن شأن السدادتين منع تلوث الأسمنت بسائل الحفر مما قد يتسبب في رداءة الترابط bond المرتقب بين البئر والقيسون، وعندما ترتطم السدادة السفلى بالطوق العائم فإنها تتمزق ويندفع الملاط إلى القعر خلال الحذاء المرشد وإلى أعلى خارج القيسون (شكل ١٩-٣).

وتوجد وصلات القيسون في مراتب grades مختلفة ويتوقف ذلك على الأحمال المتوقعة التي سوف يتعرض لها القيسون أثناء إنجازه وعلى مدى العمر الافتراضي للبئر، وعند اختبار القيسون ينبغي الأخذ في الاعتبار المعايير التالية:

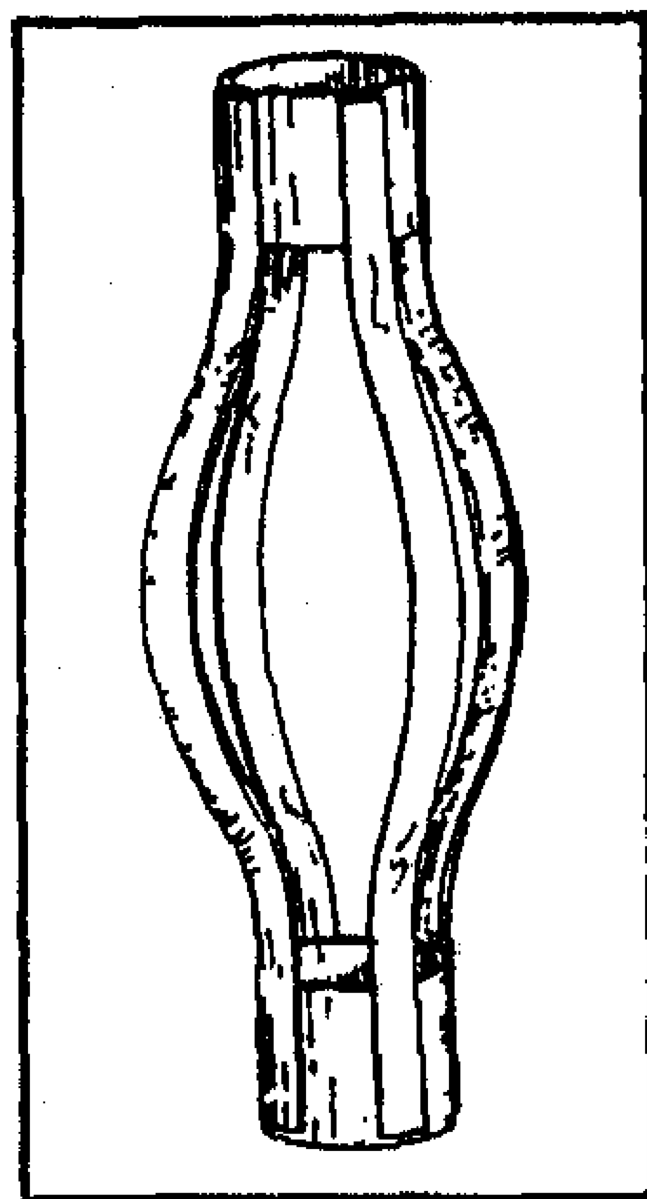
- حمل الانهيار collapse load: الذي ينشأ من الضغط الهيدروستاتيكي لسائل الحفر وملاط الأسمنت على القيسون، وكذلك وجود طبقات "متحركة" مثل الملح.
- حمل الانفجار burst load: وهو الضغط الداخلي الذي سيتعرض له القيسون أثناء العمليات.
- حمل الشد tension load: والذي يسببه وزن القيسون أثناء إنزاله ويكون أقصاه عند الوصلات العليا.
- التآكل corrosion: والذي ينتج عند وجود غازات أكّالة مثل ثاني أكسيد الكربون وكبريتيد الهيدروجين في التكوينات الجوفية مما قد يسبب التآكل السريع للصلب إذا لم يكن ذا موصفات ضد التآكل.
- حمل التحديب buckling load: وهو الحمل الذي يقع على الأنبوب ويتسبب في تحديبه وانبعاجه.



شكل ١٩-٣: عملية السمنتة داخل البئر.

وتتوقف فعالية السمنتة جزئياً على سرعة تحرك الملاط خلال الحيز الحلقي بين جدار البئر والقيسون، فإذا كان معدل الضخ عالياً فسوف ينشأ عن ذلك تدفق مضطرب (دوامي) turbulent flow وإحداث ترابط أفضل، وإذا كان المعدل بطيئاً ينتج عنه تدفق خطي linear flow وقد يسبب ترابطاً أردأ.

كذلك فإنه من المرغوب أن يكون توزيع ملاط الأسمنت متساوياً حول وصلات القيسون ولكن يصعب تحقيق ذلك مع زيادة زاوية انحراف البئر حيث يميل الملاط ناحية الجانب السفلي من البئر مما قد يمنع انتشار الملاط بشكل مستو بين القيسون وجدار البئر، ولتجنب ذلك الأمر يزود القيسون بنوع من الزنبركات springs من الصلب تسمى المركزات centralizers التي يتم تثبيتها على مسافات حول أنبوب القيسون من الخارج مما يتيح تمركز القيسون داخل البئر (شكل ١٩-٤).



شكل ١٩-٤: ممركز للقيسون.

وعند الانتهاء من أعمال السمنتة يتوقف جهاز الحفر لبعض الوقت في انتظار تصلب (شك) الأسمنت وتسمى هذه الفترة wait on cement (WOC) وذلك قبل الشروع في إنزال مجموعة جديدة لحفر السدادات والطوق العائم والحذاء وجميعها مصنوعة من مواد يسهل طحنها.

وتسمى عملية السمنتة والتي شرحناها للتو بالسمنتة الأولية primary cementation والتي كان الغرض منها مايلي:

- إيجاد ترابط جيد بين القيسون والتكوين الجيولوجي وبالتالي دعم ومساندة جدار البئر.

- منع القيسون من الالتواء أو الانبعاج في الحالات الحرجة.
- فصل النُطُق المختلفة خلف القيسون، وبالتالي عزل حركة الموائع بين الطبقات المنفذة.
- سد النُطُق المقلقة مثل التي شهدت فقداً في سائل الحفر.

وإذا كان السمنتة الأولية غير ناجحة يلزم إجراء عملية سمنتة أخرى لعلاج القصور في العملية السابقة، وتعرف العملية الجديدة بالسمنتة الثانوية secondary cementation ويتم ذلك من القيسون عند عمق معين يليه ضخ الأسمنت خلال الثقوب المستحدثة.

كذلك فقد تجري عملية مشابهة تعرف بالسمنتة بالضغط أو الكبس squeeze cementation وتجرى هذه العملية خلال مرحلة لاحقة من عمر البئر المنتجة بهدف سد الثقوب التي حدثت منها تسربات واتصالات غير مرغوبة بين الطبقات المختلفة مثل حالة اقتحام breakthrough سافر للماء الطبقي.

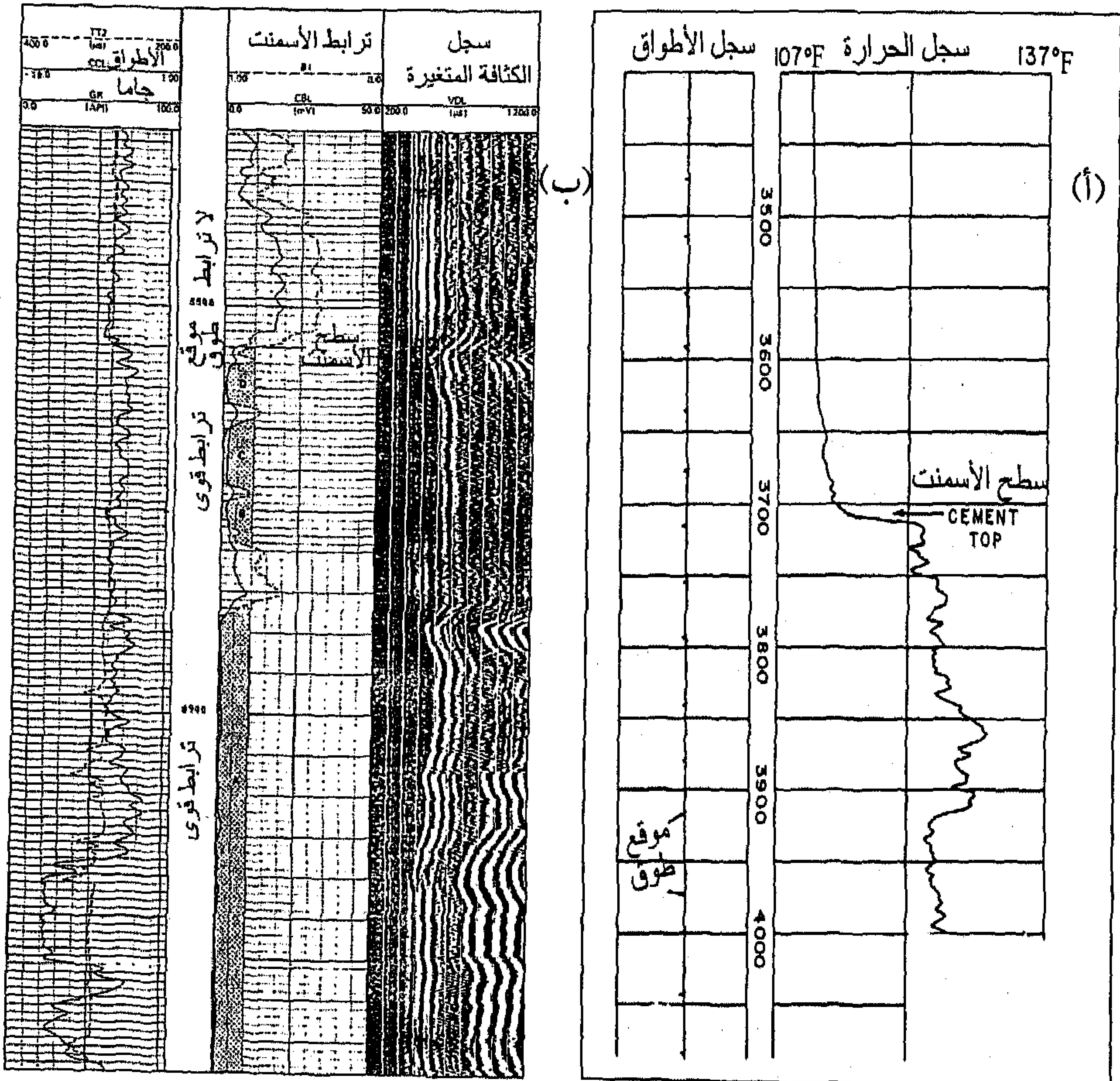
وهناك أيضاً ما يعرف بالسمنتة بالسد plug back cementation وذلك بإدخال ملاط الأسمنت داخل القيسون وعبر الثقوب قبيل البدء في إجراء مسار جانبي للبئر sidetracking أو هجر للبئر well abandonment.

كيميائية الأسمنت:

ليست كيميائية الأسمنت داخل الآبار بالأمر البسيط، فالأسمنت الذي يتم تحضيره يتكون أساساً من الأسمنت البورتلاندي بعد خلطه بالماء وبعض المواد المضافة والتي يعمل بعضها على تعجيل زمن التصلب للأسمنت setting hardening time والبعض الآخر ربما لإبطاء هذا الوقت وتسمى مواد التعجيل بالمعجلات accelerators والمواد المبطئة المبطئات retarders، كذلك فقد تعمل هذه المواد على رفع أو خفض كثافة الملاط حسبما هو مطلوب، وكذا تغيير مقاومة الانضغاط وخواص التدفق واللدانة وإزالة الماء والمحافظة على بقاء ملاط الأسمنت على الهيئة المطلوبة حيث من الضروري أن يبقى الأسمنت على القوام الملاطي حتى يمكن ضخه داخل البئر ليملأ الحيز الحلقي بين جدار البئر والقيسون قبل أن يبدأ الأسمنت في التصلب، ويعرف الزمن الذي يستغرقه الأسمنت من حالة الملاط إلى حالة التصلب بزمن تغلظ القوام thickening time وهو زمن يختلف حسب التركيبة الريولوجية rheology للأسمنت.

الاختبارات بعد السمنتة:

بعد الانتهاء من عملية السمنتة يجري في العادة تسجيل لقياس درجة الحرارة داخل البئر يعرف بسجل الحرارة temperature log وذلك بهدف تحديد قمة الأسمنت (شكل ١٩-٥) خلف القيسون حيث إن شك الأسمنت عملية كيميائية وتفاعل تنطلق بموجبه كمية واضحة من الحرارة، ويعرف هذا التفاعل بالطارد للحرارة exothermic reaction كذلك فهناك تسجيل أكثر حداثة وهو سجل ترابط الأسمنت (cement bond (CBL log) خلف القيسون ومن هذا السجل يمكن تحديد قمة الأسمنت وكذا مدى ترابط الأسمنت بين القيسون وجدار البئر (شكل ١٩-٦).



شكل ١٩-٦ (أ) سجل الحرارة لتحديد سطح الأسمنت بالإضافة إلى سجل الأطواق ومواقعها.

(ب) سجل ترابط الأسمنت خلف القيسون والكثافة المتغيرة لتحديد سطح وترابط الأسمنت داخل البئر

وإضافة إلى ذلك ثمة اختبار يعرف باختبار استقامة سلامة ووحدة البئر mechanical integrity test (MIT) حيث يتم إغلاق البئر ويشرع في ضخ سائل (ماء أو سائل الحفر) داخل البئر إلى أن يصل الضغط هناك إلى أقصاه لتوقف بعده مضخات الدفع عن عملها ويراقب الضغط، وإذا ما لوحظ انخفاض في الضغط فهذا يعني أن تسرباً قد حدث بالبئر مما يتطلب ضرورة اتخاذ إجراء مناسب في هذا الشأن حتى نتجنب أية تسربات مستقبلية للزيت أو الغاز أو حتى الماء إلى الخارج.

طرق إكمال الآبار:

- **الإكمال القاعي:**

يتم إكمال وإنجاز البئر بطرائق مختلفة تتوقف على طبيعة التكوين المنتج ومدى ثباته وعدم تعرضه للتكهف، وفي جميع الأحوال تغلف البئر بسلسلة من أنابيب التغليف تثبت بالأسمنت حتى قمة الطبقة المنتجة على الأقل، ويعرف هذا النوع من النشاط بالإكمال القاعي bottom hole completion (شكل ١٩-٧أ).

- **الإكمال الحافي:**

الإكمال الحافي barefoot (open hole) completion هو طريقة تستخدم عندما تكون الطبقة المنتجة ثابتة وغير معرضة للتكهف حيث يمكن تثبيت أنابيب التغليف بالأسمنت فوقها مباشرة وتركها غير مغلفة (شكل ١٩-٧ب)، وغالباً ما تستعمل هذه الطريقة في الآبار المنتجة من تكوينات جيرية، ويصعب تطبيقه في التكوينات الرخوة.

- **الإكمال المغلف:**

ويجري هذا النوع من الإكمال المغلف cased hole completion في حالة وجود طبقات غير ثابتة حيث يجب عندئذ دعمها وتغليفها بإحدى الطريقتين الآتيتين:

- الطريقة الأولى: حيث يمكن مد أنابيب التغليف عبر الطبقة المنتجة حتى القاع وتثبيتها بالأسمنت، ويلي ذلك تفجير ثقوب في أنبوب التغليف بمواجهة الطبقة المنتجة (شكل ١٩-٧جـ) بواسطة مدافع تثقيب perforating guns، والتي يمكن إجراؤها داخل البئر وحملها على كبل كهربائي أو على سلسلة أنبوب الإنتاج، وكانت مدافع التثقيب الأصلية تستخدم طلقات من الصلب ولكن

الآن هنـاك المـدافع النفاثـة jet perforators التـي تـستخدم شـحنات متفجـرة مشكلة، وعندما يتم تفجيرها فإن المتفجرات المخروطية الشكل تنتج نفاثات سريعـة مـن الغـازات التي مـن شـأنها إحـداث ثقـوب داخـل أنبـوب التغليـف والأسمنت والتكوين المنتج، ويمكن تشكيل المتفجرات بحيث تتميز بأقصى قطر فعـال وأقـصى عمـق للاخـتراق (١٥-٣٠ سـم) داخـل التكـوين، ولا يقتـصر التثقيب على تكوين واحد، بل يمكن إجراء ذلك على عدة تكوينات بداخل البئر الواحدة وهو ما يدخل فيما يسمى بالإكمال المتعدد multiple completion.

- الطريقة الثانية: حيث يتدلى من أسفل أنابيب التغليف قميص أو أنبـوب liner أصغر مُثقَّـب أو مـشقق (screen or slotted liner) ذو ثقـوب أو شـقوق مواجهـة للطبقـة المنتجة (شكل ١٩-٧د).

وفي الآبـار الأفقيـة تـتم عملية الإكمـال داخلهـا حـسب ظـروف وطبيعـة الخـزان الجـوفي، ويمثل الـشكل ١٩-٨ ثـلاث حـالات تـشمل الإكـمال الحـافي والإكـمال باسـتخدام القمـيص المشقق والقميص المسمنت والمثقب، وفي جميع الأحوال يتم اختيار طريقة الإكمال تبعـاً لوضـع الخزان وخصائصه البتروفيزيائية.

وفي التكوينات غير المتماسكة مثل الرمـال الـسائبة حيـث يمكـن أن يـدخل الرمـل إلى البئر مع الزيت والغاز وهذا أمر يجب منعه أو إبقاؤه إلى حده الأدنى على الأقـل للحيلولـة دون انسداد البئر والتقليل من تآكل المضخات والصمامات وأنابيب التغليف القاعيـة ومـا إلى ذلك، ومن شأن تفتت كميات كبيرة من الرمل التسبب أيضاً في تكهف الطبقات العليا وفي إلحاق الضرر بأنابيب التغليف. وللحماية تستعمل أنواع مختلفـة مـن أنابيـب التغليـف القاعيـة لمنـع تـسرب الرمـل إلى الأنابيـب المتبقيـة والأنابيـب المغلفـة بالأسـلاك وأنابيـب التغليف القاعيـة التي يجـري فيهـا دفـع الحـصى الـدقيق إلى المكـان المناسـب بـين الأنبـوب وجوانب البئر ليكون شبكة مانعة للرمل (راجـع شـكل ١٩-٧د)، ويمكـن كـذلك تقويـة الرمل باستعمال نوع خاص من الراتنجات يشد حبيبات الرمل بعضها إلى بعض دون أن يؤثر ذلك إلى حد كبير على إنتاجية البئر.

تجهيزات وملحقات الإنتاج:

أنبوب الإنتاج:

هو الأنبوب tubing الذي يتدفق خلاله الماء أو الزيت أو الغاز المنتج، وهو مصنوع من الصلب حسب المواصفات الدولية، كما أن قطره يكون أصغر من قطر القيسون، ويتراوح قطر أنبوب الإنتاج بين ٣ و١١,٥ سم (١,٢٥-٤,٥ بوصة) ويتكون من وصلات يبلغ طول الواحدة منها عشرة أمتار (٣٠ قدماً)، ويجري تدلية الأنبوب داخل البئر بعد ربط الوصلات بعضها ببعض وتستمر التدلية حتى يصل الأنبوب عند عمق أعلى قليلاً من قاع البئر، وعند نهاية الأنبوب توجد حشوة مطاطية tubing or completion packer تقوم بسد الحيز الموجود بين القيسون وأنبوب الإنتاج، كما أنها تضمن للأنبوب بأن يكون في وضع مركزي داخل البئر، كما تمنع الموائع المنتجة من التدفق إلى خارج الأنبوب (شكل ١٩-٩)، ويمكن سحب أنبوب الإنتاج إلى خارج البئر عند الحاجة إلى أعمال صيانة workover من إصلاح وإحلال للمكونات القاعية، ويستخدم عندئذ الماء المالح أو زيت الديزل لملء الحيز بين الأنبوب والقيسون ولدرء التآكل أيضاً.

وإذا كان الوضع في حاجة إلى ضخ البئر هناك مضخة داخلية لهذا الغرض عند نهاية أنبوب الإنتاج، ومن ناحية أخرى فإنه يمكن إنتاج البئر دون الحاجة إلى هذه المضخة أو حتى إلى أنبوب الإنتاج خاصة في الآبار ذات الإمكانيات الإنتاجية الفائقة حيث يتم الإنتاج داخل القيسون نفسه.

(١) إنجاز بواسطة أنبوب التغليف القاعي

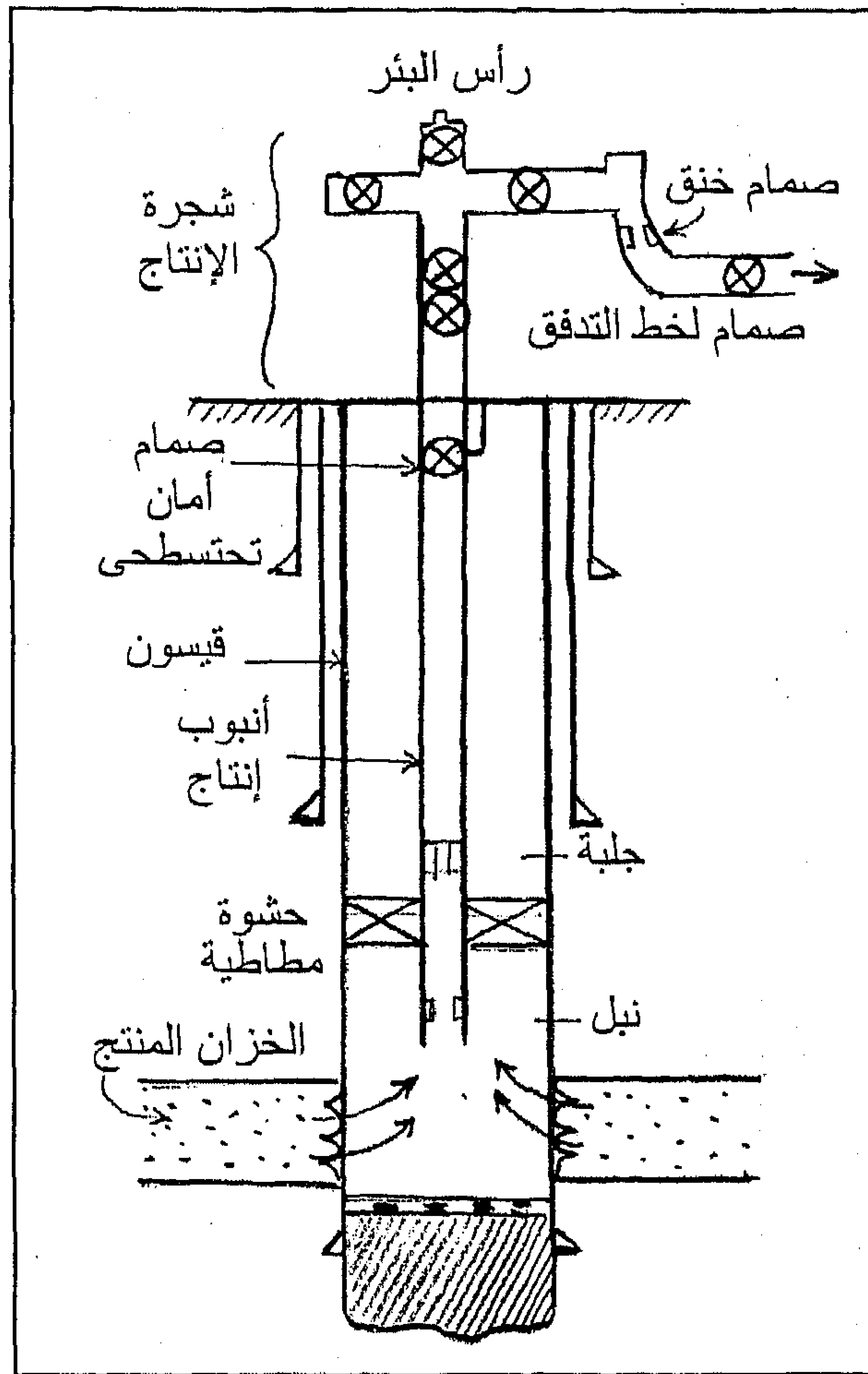
(ب) طريقة الإنجاز الحافي

(ج) الإنجاز بواسطة مدفع تثقيب

(د) أنبوب تغليف قاعي محشو بالحصى

شكل ١٩-٧: طرق الإكمال وإنجاز الآبار.

شكل ١٩-٨: حالات من الإكمال في الآبار الأفقية.



شكل ١٩-٩: رسم تخطيطي لبئر بعد إكمالها.

وفي الآبار البحرية يوجد صمام تحتسطحي للأمان subsurface safety valve (SSSV) يعمل داخل أنبوب الإنتاج ويظل هذا الصمام مفتوحاً طالما أن الضغط داخل البئر آمن ومستقر، أما إذا ما تدنى هذا الضغط فإن الصمام يقفل بشكل آلي.

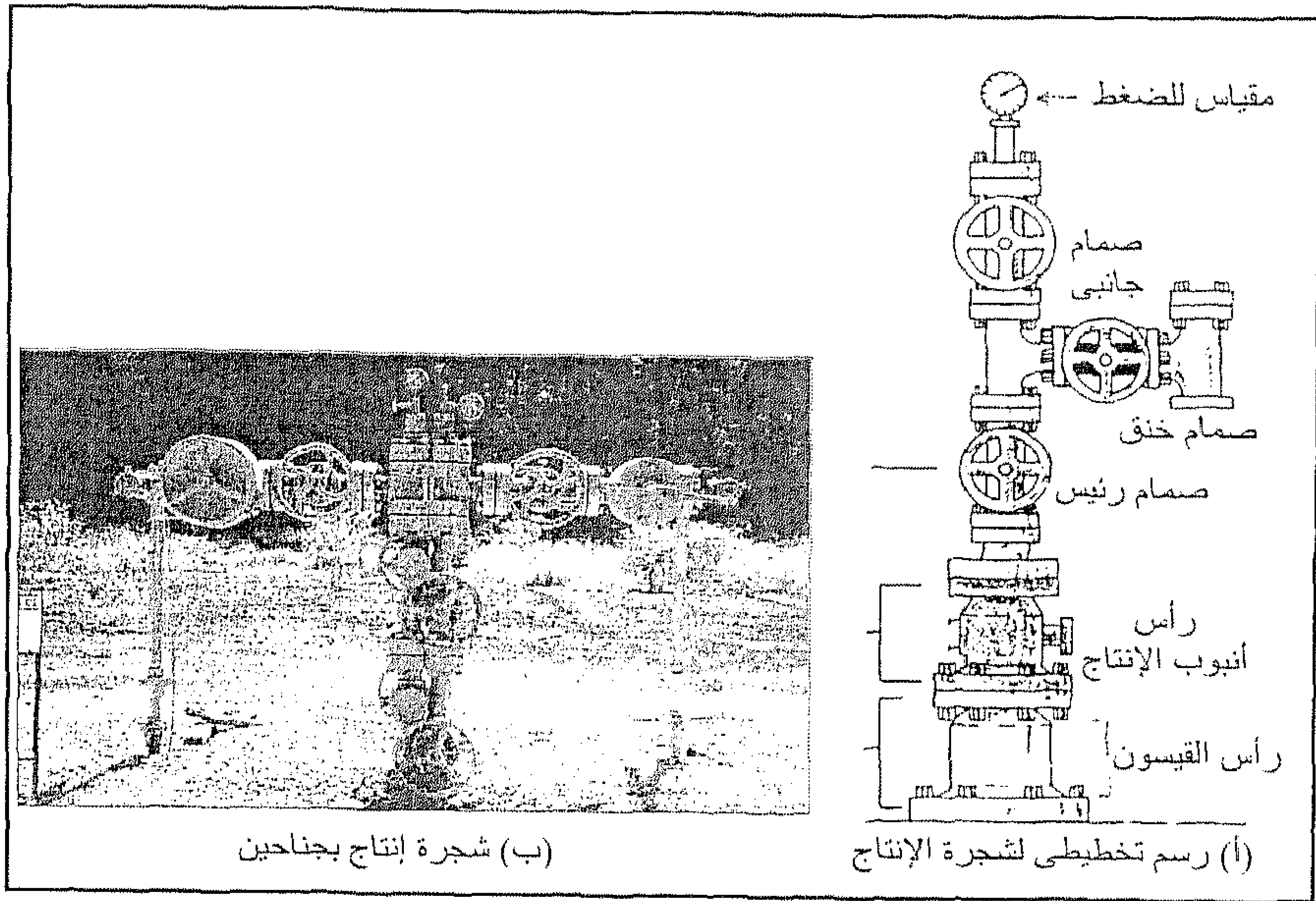
- **رأس البئر:**

من غير المعقول أن يجري إنتاج البئر بصورة عشوائية ودون التحكم في معدلات الإنتاج ذلك أن الإنتاج الجائر قد يتسبب في نتائج وخيمة بالنسبة للخزان المنتج وإحداث الضرر به، حيث يؤدي ذلك إلى تدن سريع في ضغط الخزان، وهذا يعني بالتبعية تدنياً

كبيراً في إنتاج البئر، بل وفي عمرها الإنتاجي أيضاً، وعند التدني السريع في ضغط الخزان يبدأ الغاز الذي كان مذاباً في الزيت في الانطلاق ويعمل على سد المسام البينية مما ينتج عنه تدهور في إنتاجية البئر، وتلافياً لهذه التداعيات يجري عند رأس البئر wellhead أو بداخلها التحكم في معدلات الإنتاج عن طريق صمامات خاصة تعرف بصمامات الخنق chokes (راجع شكل ١٩-٩) تتحكم في كميات الزيت أو الغاز الواردة إليها من خلال ثقوب صغيرة تسمى فتحات الإنتاج orifices، وكلما صغرت الفتحات تراجع معدل الإنتاج والعكس صحيح، وإذا كانت فتحة الصمام ثابتة الحجم يقال للصمام أنه موجب positive وإذا كانت الفتحة متغيرة فان الصمام يكون من النوع القابل للانضباط adjustable حيث يمكن تعديله وانضباطه حسب معدل الإنتاج المخطط له.

- **التجهيزات والإكمالات السطحية:**

لا تحتاج آبار الغاز عادة إلى وسيلة أو تجهيزات خاصة لرفع الغاز من الخزان المنتج، وعلى غير ذلك هناك العديد من الآبار المنتجة للزيت التي تحتاج إلى وسيلة رفع لهذا الزيت إلى السطح ويسمى ذلك بالإكمال السطحي surface completion، ولهذا الغرض تستخدم مجموعة من الأنابيب والمعدات والتجهيزات والصمامات ومقاييس الضغط عند فوهة البئر للتحكم في تدفق الموائع إلى خط التدفق flow line وتعرف هذه التركيبة الفولاذية بشجرة عيد الميلاد christmas (production) tree أو شجرة الإنتاج التي يتم تثبيتها على رأس البئر، ولشجرة الإنتاج صمام رئيس master valve مثبت عند الجزء السفلي من الشجرة ويمكن إغلاقه في الحالات الطارئة (شكل ١٩-١٠ أ)، ويسمى الجزء الجانبي من الشجرة والواصل إلى خط التدفق بالجناح wing، وإذا كانت البئر منتجة من خزان واحد تكون ذات جناح واحد single wing tree، أما إذا كان إنتاجها من خزانين تكون ذات جناحين double wing tree (شكل ١٩-١٠ ب) وعلى كل جناح يوجد صمام للتحكم في تدفق الزيت flow valve إلى داخل الخط الإنتاجي، وعند أعلى الشجرة يوجد صمام ماسح swap valve يستخدم لفتح البئر للسماح بإنزال المعدات السلكية داخل البئر في حالة القيام بإصلاح أو صيانة لها، وعند قمة الشجرة هناك مقياس للضغط pressure gauge للتعرف على ضغط أنبوب الإنتاج.



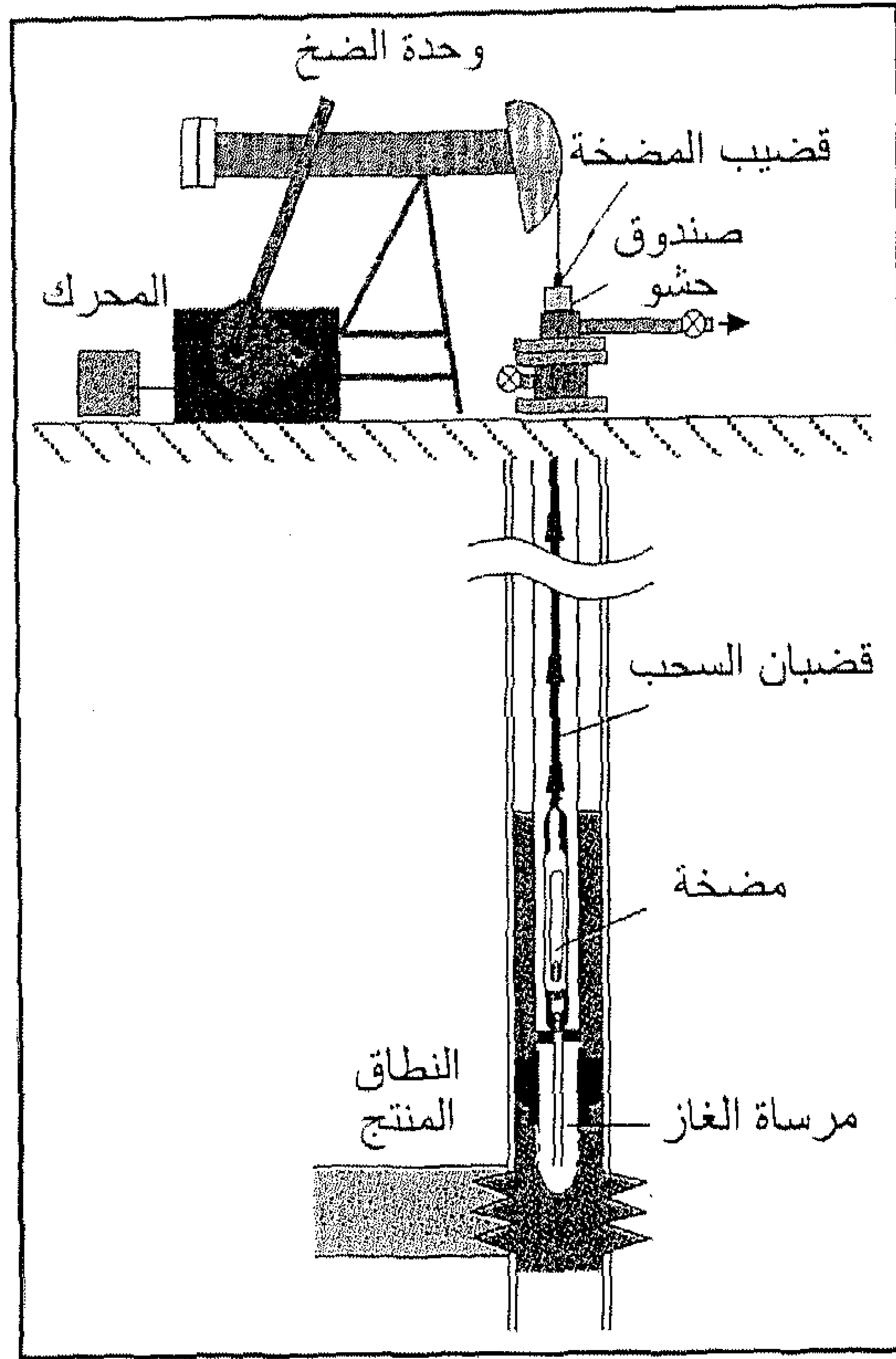
شكل ١٩-١٠: شجرة الإنتاج ومكوناتها.

الرفع الاصطناعي:

إذا كان ضغط الزيت المنتج غير كاف لتدفقه إلى السطح بشكل طبيعي هناك عدد من الوسائل لرفع هذا الزيت وتسمى هذه الوسائل بالرفع الاصطناعي artificial lift ويتطلب الأمر عندئذ إزالة شجرة عيد الميلاد واستبدالها بالمعدات اللازمة للرفع.

- **المضخة الماصة (الصكرود):**

تعتبر طريقة المضخة الماصة (الصكرود) sucker-rod pump من أكثر التقنيات الشائعة الاستخدام ويمكن مشاهدتها في كثير من الحقول المنتجة. وتستخدم في هذه الطريقة مضخات جوفية، والمضخة الشائع استخدامها إطلاقا هي ذات الغاطس المتردد البسيط التي تحركها قضبان سحب sucker-rod من وحدة ضخ قائمة عند السطح (شكل ١٩-١١ أ، ب). وتثبت المضخة عموماً في أسفل مجموعة أنابيب الإنتاج ويرتفع الزيت عندئذ عبر أنابيب الإنتاج في حين يشكل القيسون ممراً للغاز لئلا يعرقل ضخ الزيت جدياً، أما الحركة الترددية لتشغيل المضخة الجوفية فتؤديها عادة وحدات عند السطح تشغلها محركات على الغاز أو الكهرباء أو الديزل وتتم معادلة وزن قضبان السحب والسائل الذي يجري رفعه بوزن انضباطي أو بأسطوانة من الهواء المضغوط.



شكل ١٩-١١أ: الرفع بمضخة الصكرود.



شكل ١٩-١١ب: صورة أرشيفية لبئر إنتاجية في حقل سدر بخليج السويس تعمل بالصكرود.

وبداخل المضخة الجوفية صمامان أحدهما متحرك والآخر ثابت، ويتكون كل صمام من كرة من حديد على مقعد له ثقب، وتسمح هذه الكرة للزيت بالتدفق إلى أعلى فقط خلال الصمام، ويعمل السائل المتدفق على رفع الكرة إلى أعلى تاركة مقعدها وعندئذ يفتح الصمام، ولا يستطيع السائل النزول لأسفل مرة أخرى حيث تكون الكرة قد عادت إلى مقعدها من جديد لتمنع السائل من أن يرتد إلى أسفل، ومع كل شوط stroke للصمام المتحرك يتوالى رفع السائل إلى أعلى خلال أنبوب الإنتاج وعادة ما يكون ذلك بواقع ١٠ إلى ٢٠ شوطاً في الدقيقة.

أما بالنسبة لوحدة الضخ السطحية beam pumping unit فإنه يتم تثبيتها على قاعدة متينة من الخرسانة أو الصلب، ولهذه المضخة ذراع متحركة walking beam ترتكز على سطح ارتكاز وتتحرك إلى أعلى وإلى أسفل ويكون تشغيلها عادة بواسطة محرك كهربائي ولكن يمكن أيضاً تشغيلها بواسطة الغاز المنتج من البئر.

وعلى الطرف الآخر للذراع المتحركة توجد سلسلة الصكرود والتي تتصل بدورها بالمضخة الجوفية، وتُصنع قضبان الصكرود من سبيكة من الصلب ذات قطر ١ إلى ٣سم (٠،٥ إلى ١،٢٥ بوصة) ويبلغ طول القضيب ثمانية أمتار (٢٥ قدماً) ويتم التصنيع حسب المواصفات الدولية من حيث نوع وجودة السبيكة وعمق البئر والإجهاد الواقع وظروف التشغيل الأخرى.

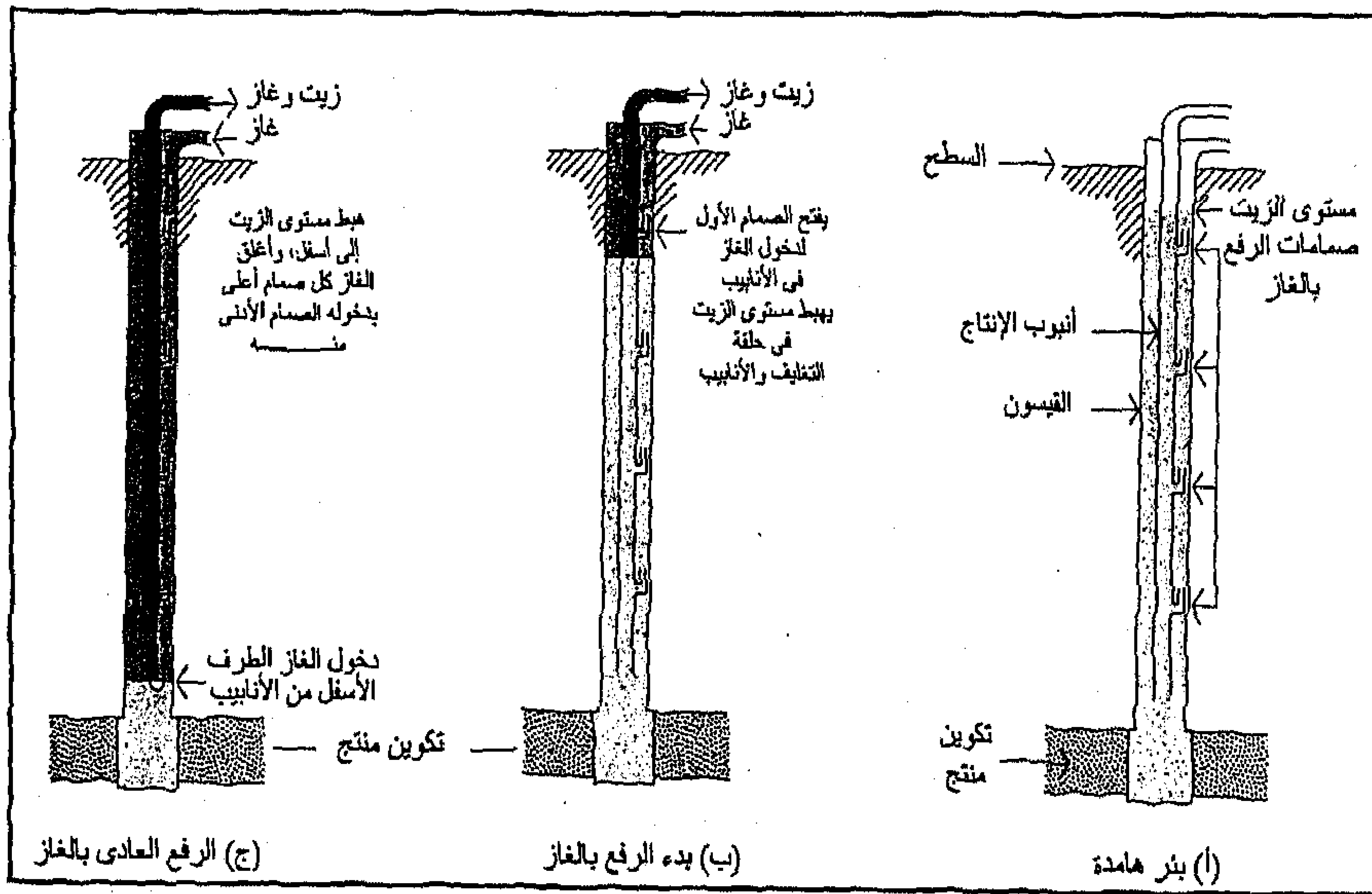
وتضم مكونات المضخة السطحية زوجاً من الأثقال الموازنة counter weight من الصلب وذلك للحفاظ على اتزان سلسلة الصكرود على الذراع المتحركة أثناء التشغيل، كما يوجد لوح مقوس من الصلب يعرف برأس الحصان horsehead في نهاية الطرف الآخر من الذراع المتحركة ويعمل على أن يكون الجر والشد على سلسلة الصكرود عمودياً.

ويوضح الشكل ١٩-١١ب صورة أرشيفية لبئر إنتاجية بحقل سدر بخليج السويس تعمل بالمضخة الماصة (الصكرود).

- **الرفع بالغاز:**

الرفع بالغاز gas lift هو وسيلة أخرى من الرفع الاصطناعي حيث تقوم هذه الطريقة على حقن الغاز الخامل في الحيز القائم بين القيسون وأنبوب الإنتاج، وعادة ما

يكون الغاز الطبيعي المنتج من الآبار هو الغاز المستخدم ويتم ذلك بواسطة صمامات خاصة وهي من النوع الضاغط الذي يفتح ويقفل وموزعة على طول سلسلة أنابيب الإنتاج (شكل ١٩-١٢)، وتسمح هذه الصمامات بتدفق الغاز في أنبوب الإنتاج حيث يذوب هذا الغاز في السائل المنتج ويبقي بعضه على هيئة فقاقيع، وبالطبع فإن وجود الغاز سوف يعمل على تقليل كثافة السائل المنتج وكذلك فإن وجود الفقاقيع يعمل على رفع السائل المنتج إلى أعلى الأنبوب حتى السطح، ويمكن حينئذ تدوير الغاز الوارد واستخدامه من جديد، ويتميز أسلوب الرفع بالغاز بعدم وجود تجهيزات سطحية كثيرة بما فيها الأجزاء المتحركة، كما أنه أسلوب غير مكلف نسبياً خاصة إذا كانت هناك تسهيلات مركزية للضواغط المستخدمة، وهو أيضاً أسلوب فعال في الآبار الضحلة، كما أنه عادة ما يستخدم في الآبار البحرية، وكذلك يمكن أن يكون العمل بشكل مستمر أو متقطع خاصة في الآبار ذات الإنتاج المنخفض حيث قد يلزم الأمر توقيفها لفترة زمنية معينة بهدف استعادة قدرتها الإنتاجية.

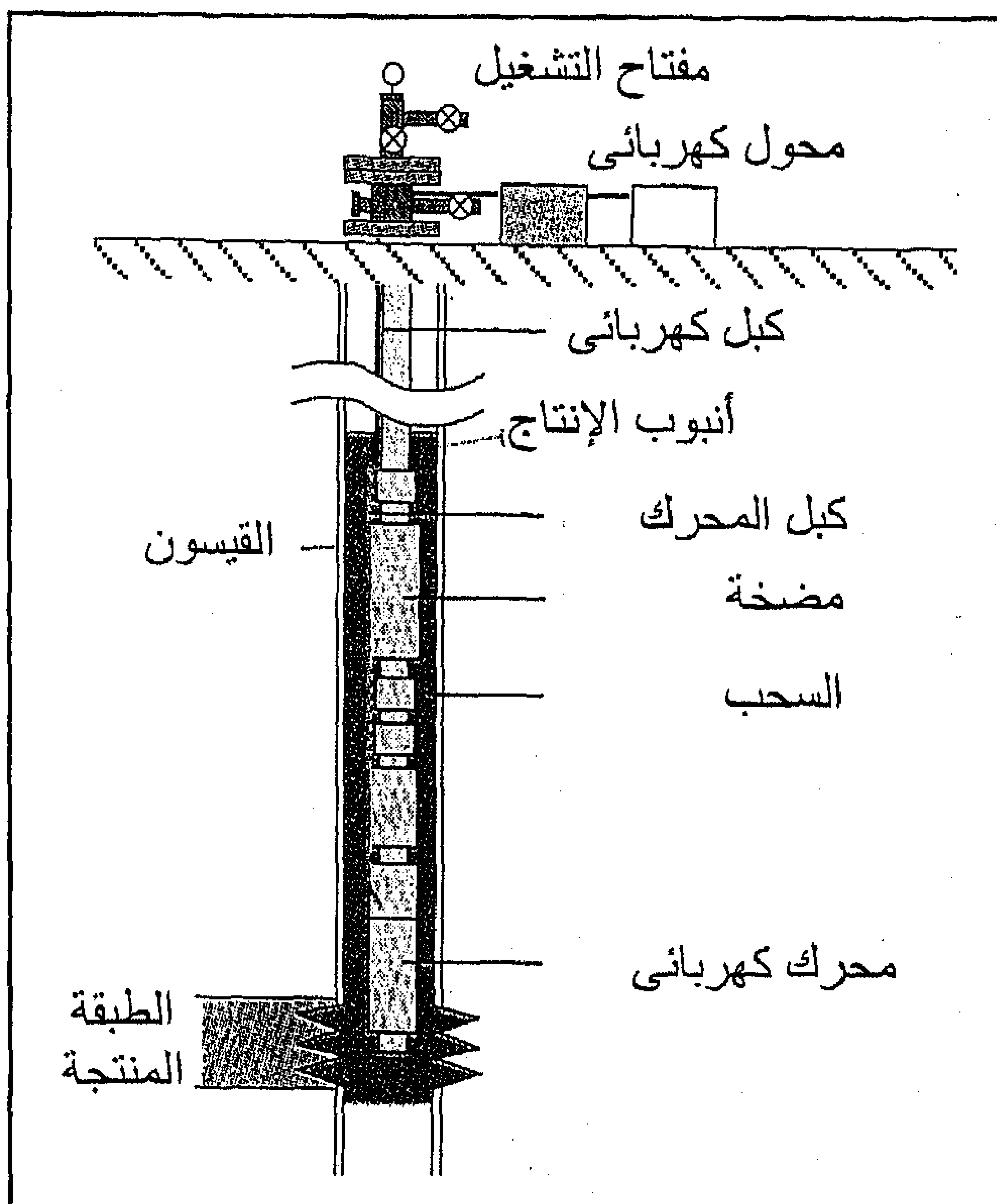


شكل ١٩-١٢: عمل صمامات الرفع بالغاز.

- **الرفع بالمضخة الغاطسة:**

تستخدم طريقة الرفع بالمضخة الغاطسة electric submersible pump (ESP) محركاً كهربائياً الذي يدير مضخة نابذة (تعمل بالطرد المركزي) بها عدة أرياش blades

دوارة على عمود بقعر أنبوب الإنتاج والذي يتصل بكبل كهربائي مدرع ويتم تزويد الكهرباء عن طريق محول على السطح، كذلك فإن المحرك الكهربائي له سرعات مختلفة يمكن تعديلها وضبطها لتتفق مع كميات السائل المنتج والمطلوب رفعه إلى خارج البئر، ويستخدم هذا النوع في رفع كميات كبيرة من السوائل خاصة في حالة الآبار المنعطفة والمائلة، كما يوجد جهاز أسفل المضخة لمنع تكوين الغاز وتجمعه في المضخة ومن ثم تقليل كفاءة ضخها (شكل ١٩-١٣).



شكل ١٩-١٣: الرفع بالمضخة الغاطسة.

- **الرفع بالمضخة الهيدروليكية:**

هذه المضخة hydraulic pump تشبه كثيراً مضخة الصكرود فيما عدا أنها تدار بالضغط الهيدروليكي بواسطة ضخ سائل في البئر، وتستخدم في العادة مضختان من النوع الترددي؛ واحدة على السطح تقوم بضخ زيت يعمل كقوة محركة power fluid (وعادة ما يكون الزيت الخام الموجود في مستودعات التخزين) إلى داخل سلسلة أنبوب

الإنتاج، وهذا الزيت من شأنه إدارة المحرك الهيدروليكي الموجود في قعر الأنبوب، وهو مرتبط بمضخة تشبه مضخة الصكرود توجد أسفل مستوى السائل في البئر، وتقوم هذه المضخة برفع كل من سائل الطاقة والسائل المنتج ودفعهما إلى أعلى أنبوب إنتاج آخر، ويسمى هذا النوع من المضخات parallel free pump وهناك نوع آخر يسمى casing free pump حيث يضخ سائل الطاقة داخل أنبوب الإنتاج أما السائل المنتج فيذهب إلى الحيز الموجود بين القيسون وأنبوب الإنتاج.

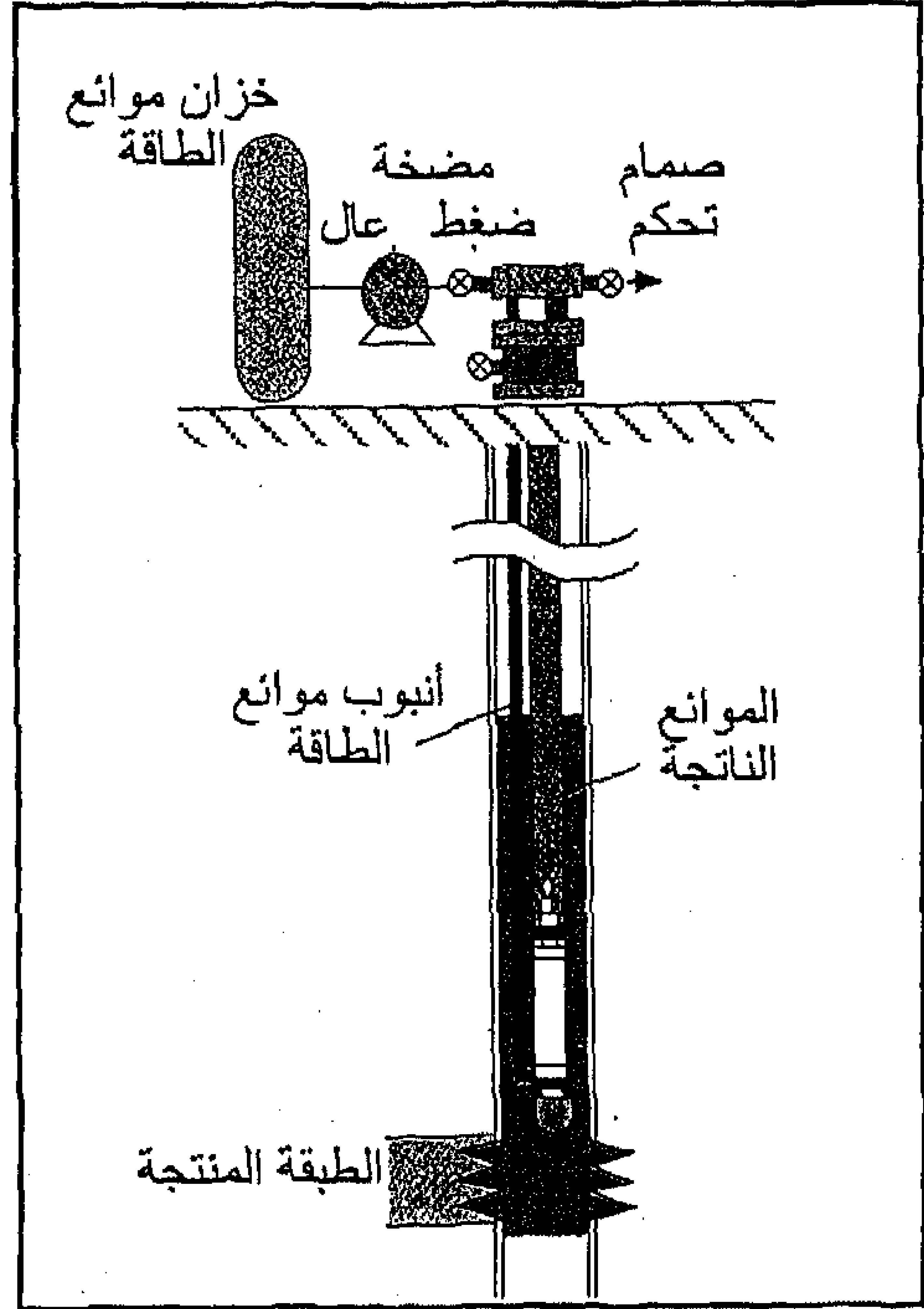
- **الرفع بالمضخة النفاثة:**

على غير ما تقدم من الأنواع السابقة من المضخات في نقل الطاقة الميكانيكية إلى السوائل المنتجة فإن المضخة النفاثة jet pump من شأنها إضافة طاقة للموائع المنتجة وذلك عن طريق اختلاط هذه الموائع بالسائل ذي الطاقة العالية والذي يتم تعجيله وتسارعه خلال منفث nozzle حيث تتزايد سرعة التدفق منطلقة إلى أعلى البئر (شكل ١٩-١٤)، وتجدر الإشارة إلى أن المضخة النفاثة ليس لها أجزاء متحركة كما يمكن تصنيعها في هيئة متضامة.

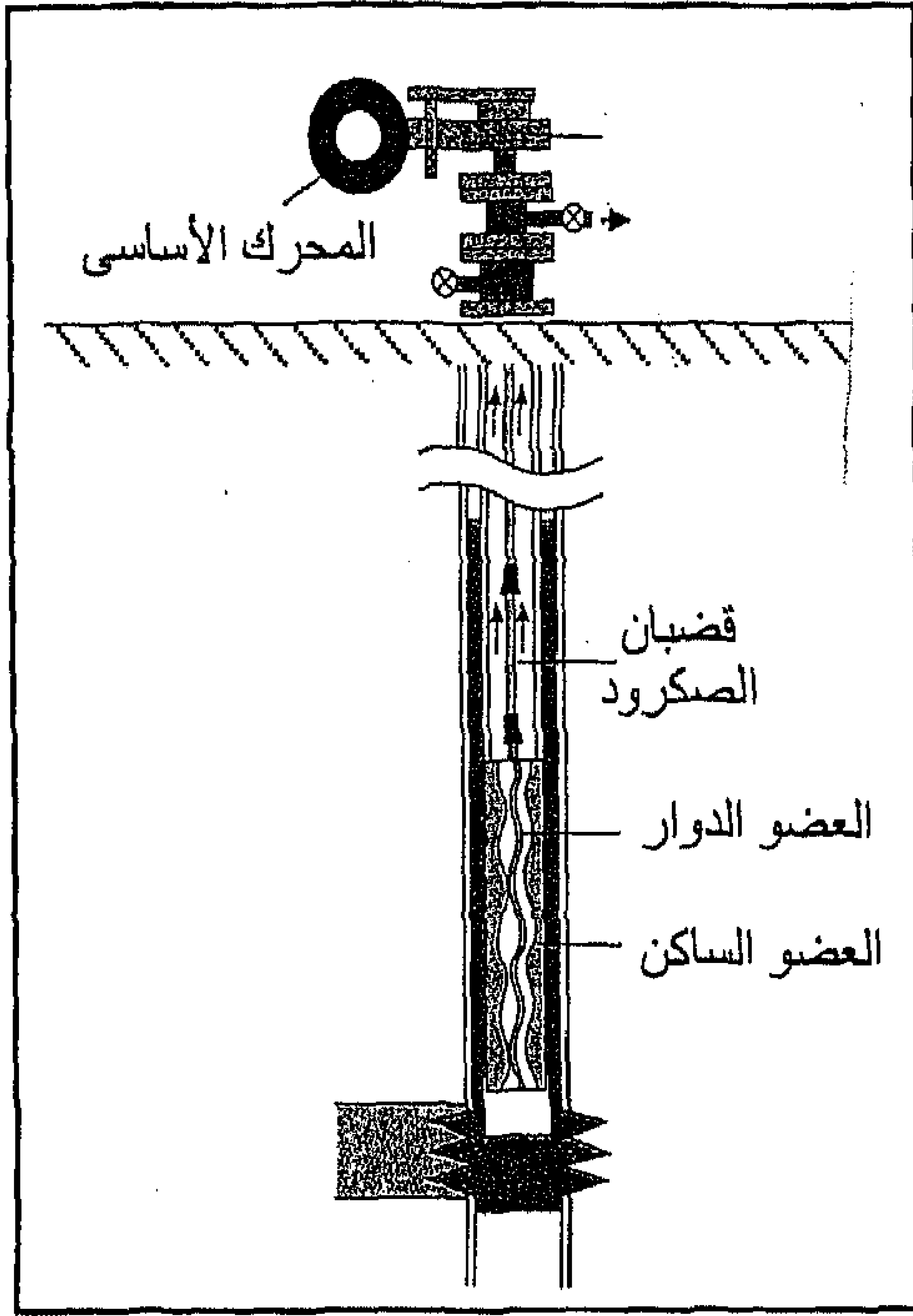
- **الرفع بالمضخة التدريجية:**

تتكون المضخة التدريجية progressive cavity pump من مجموعة تجهيزات تحتسطحية تدار بواسطة محرك على السطح ويربط بينهما القضبان الماصة (شكل ١٩-١٥) ويتناسب معدل إنتاج البئر من الخام تبعاً للحركة الدورانية للمجموعة التحتسطحية، ويتميز هذا النوع من المضخات بالكفاءة العالية خاصة في الآبار الضحلة وذات الإنتاجية المنخفضة واحتوائها على الزيت العالي اللزوجة.

وبناء على الإحصائيات فإن الرفع بالصكرود هو الأكثر شيوعاً بين بقية طرق الرفع الاصطناعي الأخرى حيث يمثل حوالي ٨٠٪، يليه الرفع بالغاز ١٠٪ والـ ١٠٪ المتبقية تكون لكل من المضخات الغاطسة والهيدروليكية والنفاثة وغيرها.



شكل ١٩-١٤: الرفع بالمضخة النفاثة.



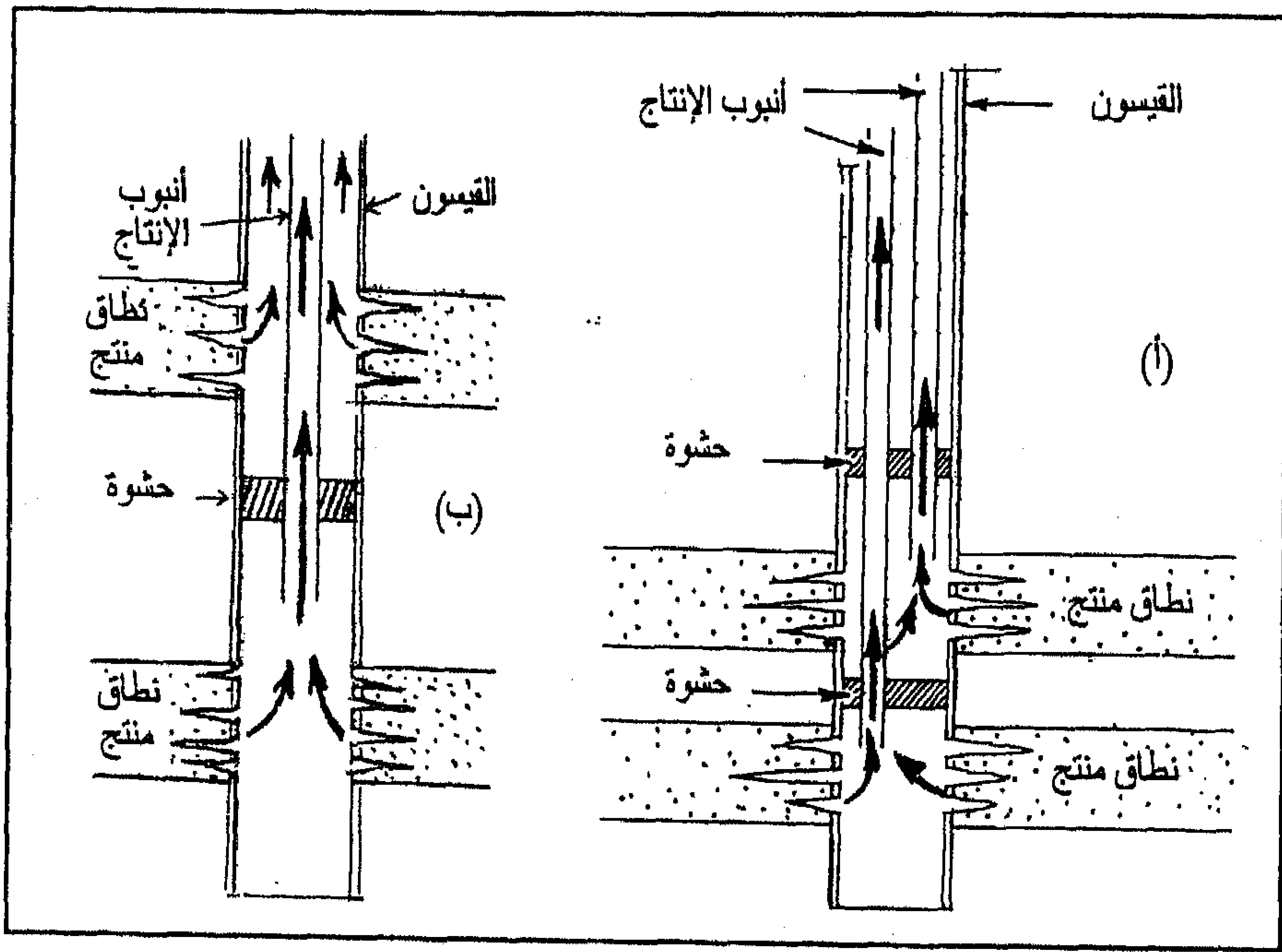
شكل ١٩-١٥: الرفع بالمضخة التدريجية.

الإكمال المتعدد:

لا يقتصر الإنتاج من البئر الواحدة على طبقة منتجة واحدة فقد يتخطى ذلك لنحصل على إنتاج من أكثر من طبقة، وقد يتم خلط الإنتاج الوارد من الطبقات المنتجة ويسمي ذلك بالإكمال المشترك commingled completion، وفي حالة الطبقتين يلزم حشوتين packers وزوج من أنابيب الإنتاج ويسمى إكمالاً مزدوجاً dual completion (شكل ١٩-١٦أ)، إلا أنه يمكن استخدام حشوة واحدة وأنبوب إنتاج واحد وفي هذه الحالة يكون إنتاج إحدى الطبقتين عن طريق الحيز الواقع بين القيسون وأنابيب الإنتاج (شكل ١٩-١٦ب)، ويكون لشجرة الإنتاج جناحان بدلاً من جناح واحد (راجع شكل ١٩-١٠)، وإذا كان الإنتاج يتم بواسطة مضخة الصكرود يكون للمضخة السطحية ذراعان وأكثر من أنبوب للصكرود للبئر الواحدة.

وبالإضافة أيضاً إلى الإكمال الثنائي هناك إكمال ثلاثي triple completion عندما يكون لدينا ثلاث طبقات منتجة في بئر واحدة وهكذا يتعدد أسلوب الإكمال ومن ثم كانت التسمية بالإكمال المتعدد multiple completion.

وفيما يتعلق بالبئر المنتجة فأحياناً يتم تزويدها بأجهزة إحساس sensors يمكن لها قياس خواص التدفق مثل معدل التدفق والضغط ونسبة الغاز إلى الزيت، كما تزود البئر بفتحة إنتاجية انضباطية adjustable choke تعمل بالأساليب الهيدروليكية وذلك بهدف الحصول على المعدلات المثلى للإنتاج من البئر، ويسمى هذا النوع الآبار الذكية intelligent (smart) wells.



شكل ١٩-١٦: إكمال ثنائي التدفق باستخدام:

(أ) أنبوبين منفصلين للإنتاج. (ب) قيسون وأنبوب إنتاج واحد.

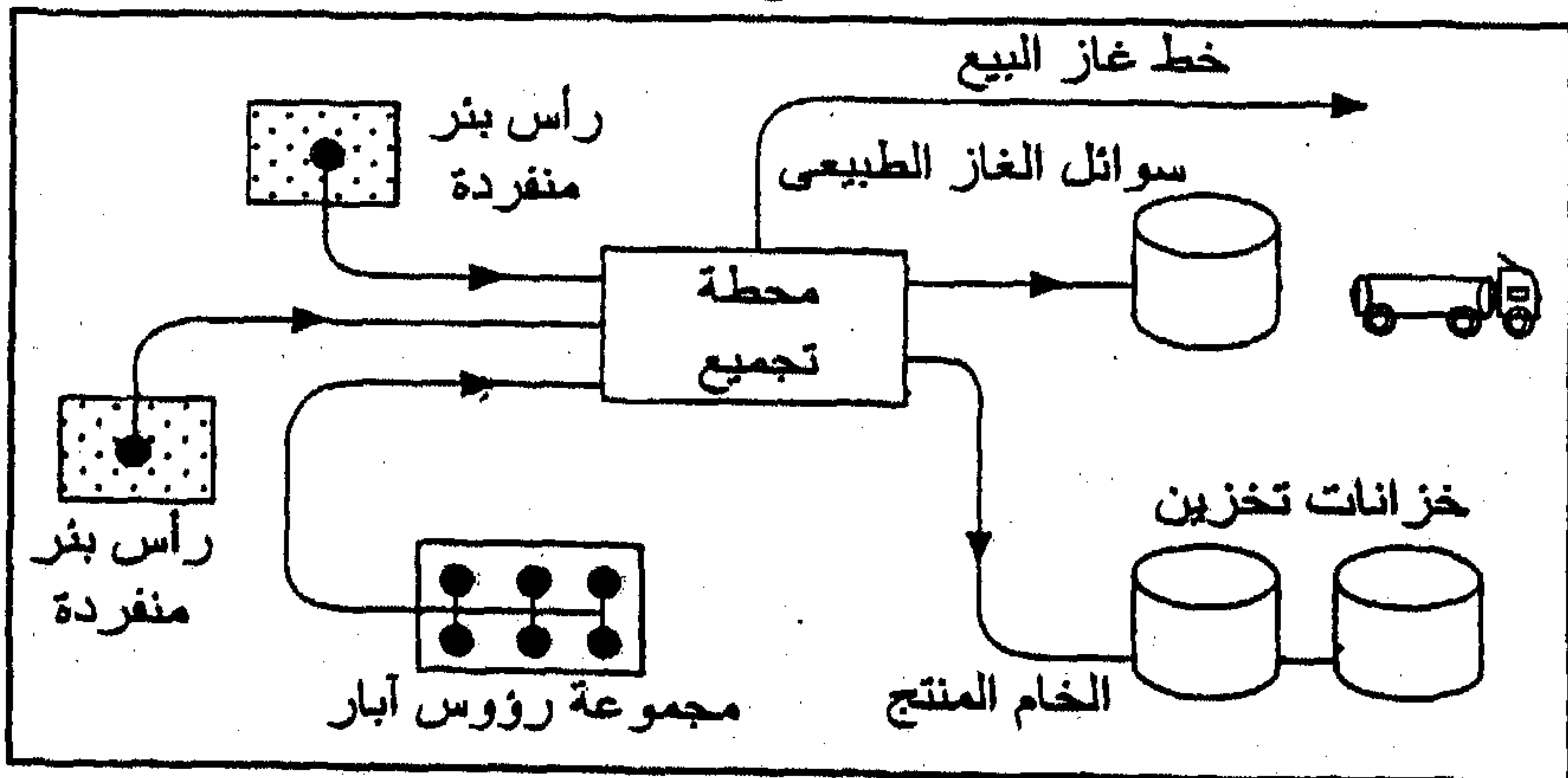
الفصل العشرون

المعالجة السطحية وتخزين الخام

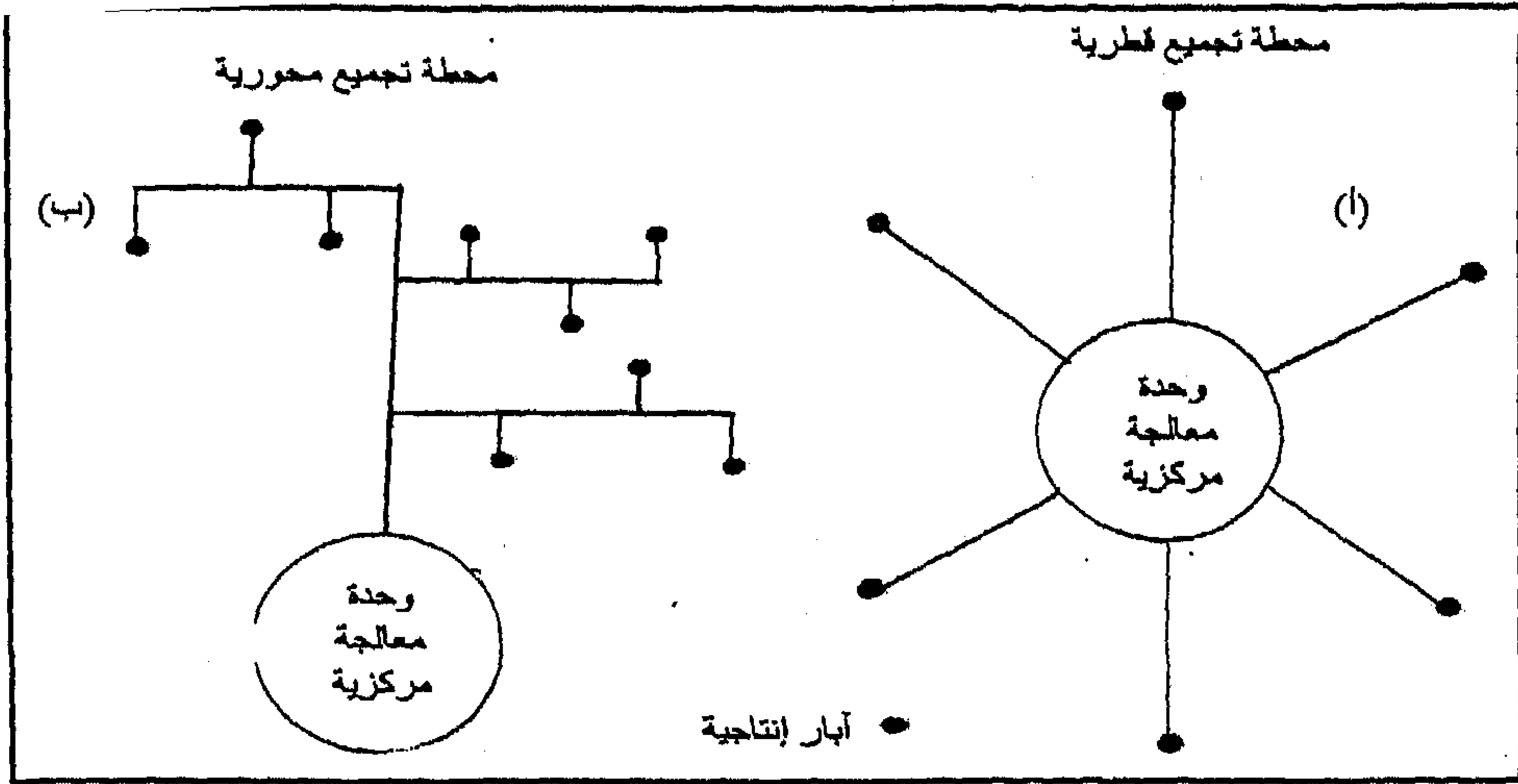
عادة ما يصاحب الزيت المنتج عند رأس البئر قدر معين من الغاز وربما الماء؛ لذا كان من الضروري إقامة المرافق والتسهيلات اللازمة لفصل الغاز والماء من الزيت وقياس حجم كل من الموائع المنتجة ونقل الزيت بعد ذلك إلى المستودعات الرئيسة عبر خطوط الأنابيب أو الناقلات، وفيما يلي شرح للتسهيلات والمنشآت المقامة لهذا الغرض.

خطوط التدفق:

وهي خطوط مصنوعة عادة من الصلب ولكنها قد تكون أحيانا من البلاستيك أو الزجاج الليفي وعبر هذه الخطوط flow lines يسير إنتاج كل بئر من الآبار من رأسها wellhead إلى محطة للتجميع gathering station (شكل ٢٠-١). وهذه المحطة مزودة بأجهزة لفصل الغاز وبصهاريج يمكن فيها قياس الزيت وتصريف ما يستقر معه من ماء، ويكون إنتاج الآبار في الموقع مختلطاً بوجه عام، إلا أن هناك عادة مجموعة من مستقلة من أجهزة فرز اختبارية وصهاريج يتحول إليها إنتاج كل بئر على حدة لقياسه، ويجري عادة ضخ الزيت من محطة التجميع إلى الصهاريج الرئيسة مباشرة، وقد يكون النظام التجميعي لخطوط التدفق على نمط نصف قطري radial (شكل ٢٠-٢أ) أو محوري axial (شكل ٢٠-٢ب) وتتصل جميع الخطوط في النهاية بوحدة معالجة مركزية central processing unit وعلى كل خط تدفق توجد صمامات أو بوابات يتم تصميمها وذلك لتنظيم معدل التدفق داخل الخط حيث يمكن إغلاق أو فتح الخط حسب الحاجة وبصورة آلية أو يدوية.



شكل ٢٠-١: رسم تخطيطي لتسهيلات إنتاج أرضية.



شكل ٢٠-٢: النظام التجميعي لخطوط التدفق (أ) نمط قطري (ب) خط محوري.

واذا كان الغاز وبخار الماء يتدفقان داخل خط الأنابيب فإن الغاز عندما يبرد وينخفض الضغط فإنه يتمدد ويعمل ذلك على تصلد الماء مكوناً الهيدرات hydrates والتي يمكن أن تسد خط التدفق، وتشبه الهيدرات في مظهرها قطع الثلج وتحتوى على جزيئات غاز الميثان داخل بلورات الثلج، وتتكون هذه الهيدرات عند درجات الحرارة بين درجة واحدة تحت الصفر إلى ٢٠ درجة مئوية (٣٠ إلى ٧٠ فهرنهيت) حسب الضغط الواقع.

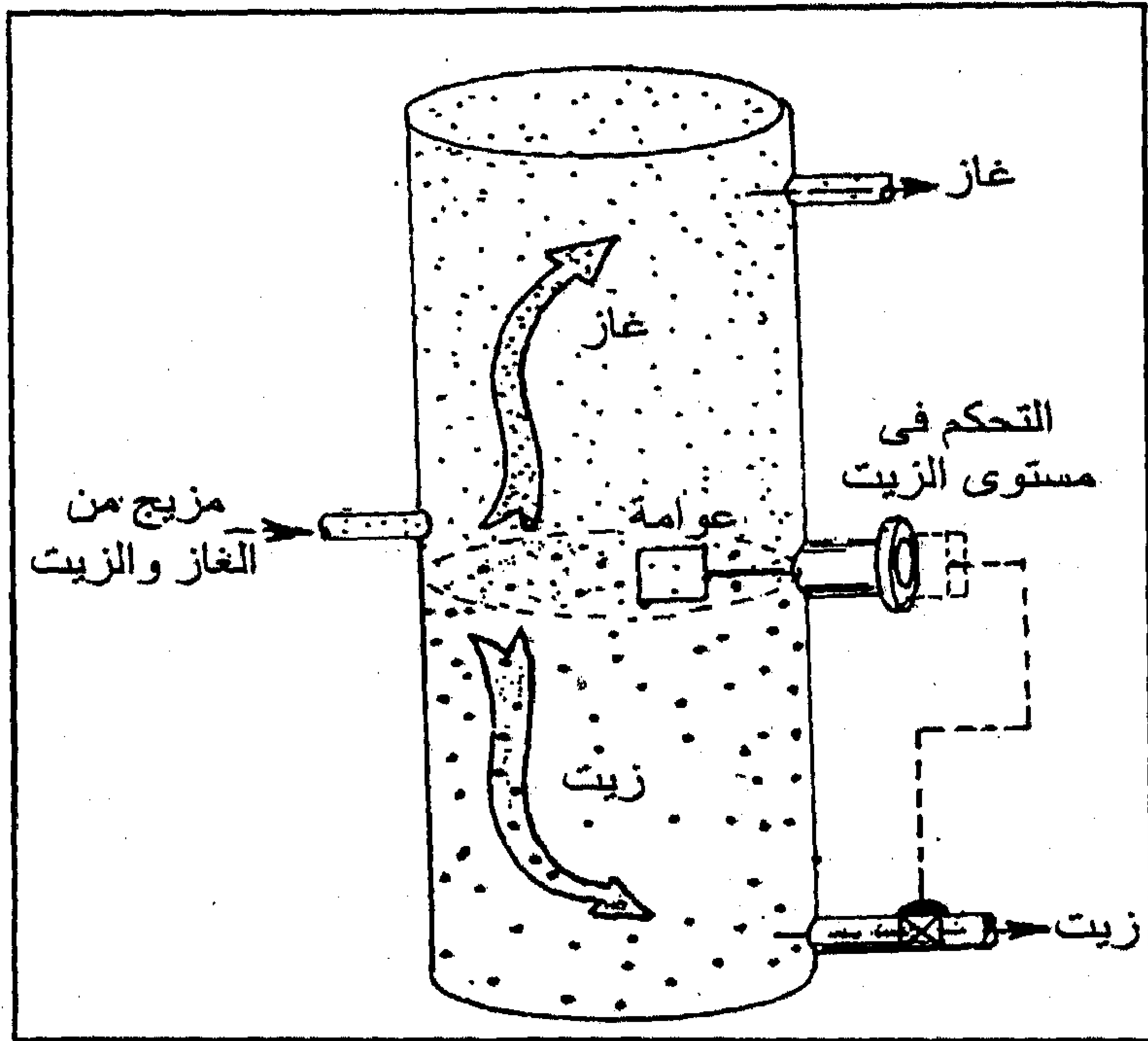
ولما كانت الهيدرات قد تتسبب في انسداد خطوط الأنابيب فإن تجفيف الغاز قبل الدخول إلى خط التدفق يساعد كثيراً على عدم تكون هذه الهيدرات، ولهذا الغرض يمكن تركيب سخانات heaters أو استخدام مواد كيميائية مثل الجليكول أو الميثانول وإضافتها إلى السوائل المنتجة للحيلولة دون تكون الهيدرات.

أجهزة الفصل (الفرازات):

الفواصل أو الفرازاتseparators هي أوعية من الصلب أسطوانية الشكل وتتوافد إليها الموائع المنتجة من الآبار. وعادة ما تحتوى هذه الموائع على كميات من الماء والغاز التي يتطلب فصلها وفرزها، ولكل فاصل مدخل inlet وعدد من المخارج outlets على ارتفاعات مختلفة تتناسب وطبيعة الموائع المنفصلة، ويتم داخل الجهاز فرز المائع حيث يحتل الغاز قمة الجهاز في حين يستقر الزيت والماء في الجزء السفلي، ويكون الماء في القعر

نظراً لكثافته العالية نسبياً مقارنة بالزيت، وقد يكون الفاصل عمودياً أو أفقياً ويحتوى على عوارض فارزة، أما التركيب التفصيلي لأجهزة الفرز فيختلف اختلافاً شاسعاً حسب السعة المطلوبة وضغط التشغيل الذي قد يصل إلى عدة آلاف من الأرطال على البوصة المربعة.

ويصل ارتفاع الفاصل الرأسي (شكل ٢٠-٣) إلى ٣،٥ متر (١٢ قدما)، أما قطر الفاصل الأفقي (شكل ٢٠-٤) فقد يصل إلى خمسة أمتار (١٦ قدما)، ويمكن أن يكون الفاصل ثنائي الطورtwo-phase separator. حيث يتم فرز الغاز من السائل أو أن يكون ثلاثي الأطوار three-phase separator لفرز الموائع الثلاثة (غاز، زيت، ماء).



شكل ٢٠-٣: فاصل رأسي.

واذا كان فصل الماء عن الزيت يتم بواسطة الجاذبية فيسمى هذا الماء ماءً حراً free water، ومن ناحية أخرى إذا كانت هناك قطيرات من سائل مخاطة بسائل آخر فهذه الحالة تسمى مستحلباً emulsion، وأكثر المستحلبات شيوعاً هي عندما تكون هناك قطيرات من الماء عالقة في الزيت، ويسمى المستحلب في هذه الحالة مستحلب الماء في

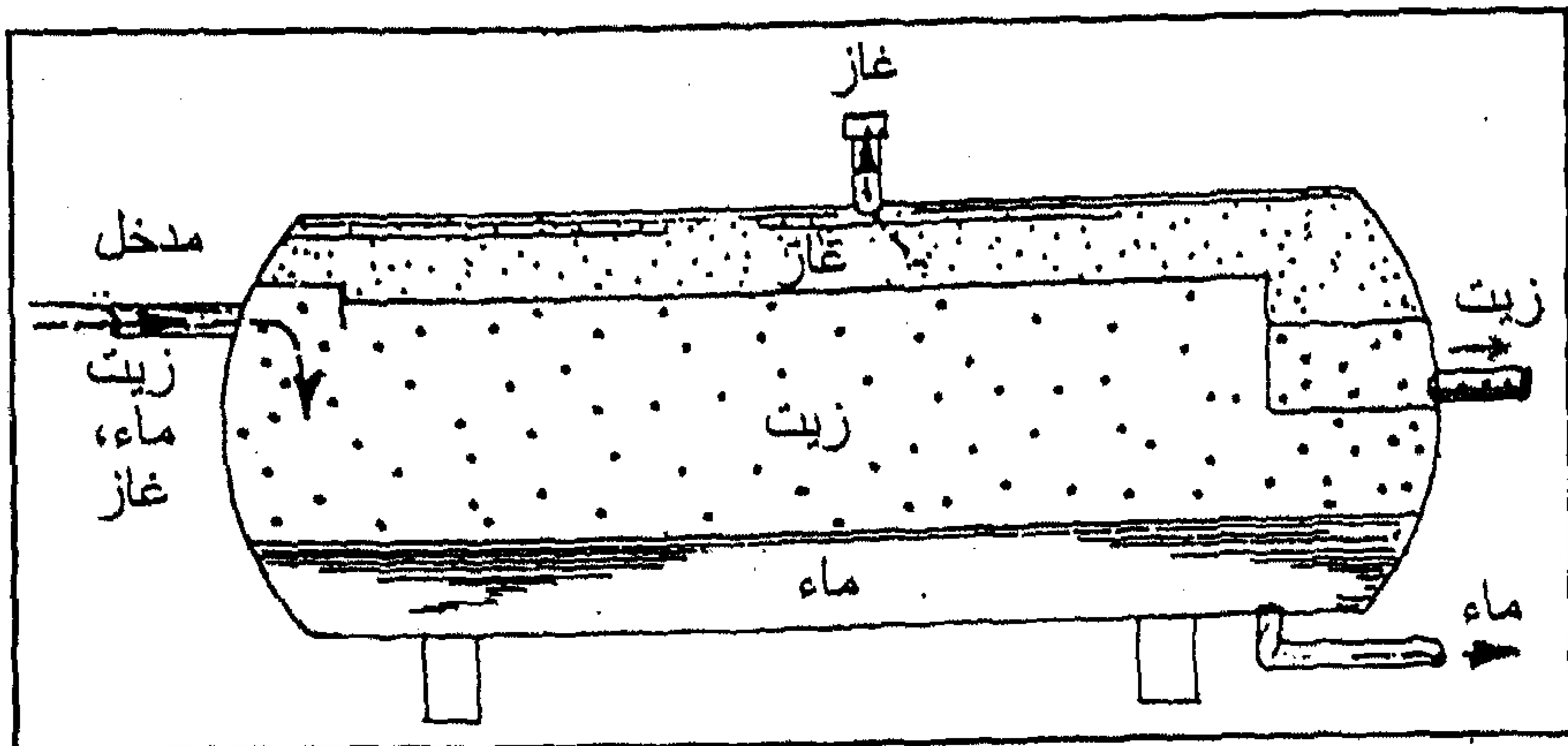
الزيت water-in-oil emulsion. وقد تكون هناك قطيرات من الزيت عالقة في الماء ويقال للمستحلب عندئذ مستحلب الزيت في الماء oil-in-water emulsion، وتعرف متانة المستحلب emulsion tightness بأنها الدرجة التي عندها تكون القطيرات عالقة وتقاوم الفصل، ويمكن للمستحلب أن يكون متماسكاً tight ويقاوم الفصل، أو سائباً loose عندما ينفصل على وجه السرعة.

وتستخدم الفواصل جميعها الجاذبية لفصل الغاز والزيت والماء، وفي المقطع الخاص بالانتشار diffuser section داخل الفاصل الرأسي تتجمع الموائع الداخلة إليه حول جدار الجهاز لكي تسمح للقوة الطاردة المركزية من المساعدة في الفرز الأولي، أما في الفواصل الأفقية فإن الموائع الداخلة إليها ترتطم بلوح من المعدن يعمل على تبطئة وتحويل اتجاه التدفق حيث تتمكن شدة الارتطام من المساعدة في الفرز الأولي.

أما في الجزء الخاص بغسل الغاز gas scrubbing section فإن منزعات الضباب mist extraction كثيراً ما تستخدم في الالتحام بقطيرات السائل وإزالته قبل أن يغادر الغاز المخرج الخاص به، ومن منزعات الضباب الشبكة السلكية wire mesh المكونة من حصير رقيق النسيج woven mats من أسلاك الصلب غير القابل للصدأ ويتم حشوها داخل أسطوانات خاصة، كما تستخدم في هذا الغرض أيضا ألواح معدنية ذات أرياش vanes لها جيوب لتجميع السوائل بها. ويتم احتجاز السائل في غرفة خالية ويجري الفصل بواسطة الجاذبية، ويمكن استخدام العوارض baffles وهي عبارة عن ألواح منبسطة يتدفق فوقها السائل على هيئة فيلم رقيق، وهناك أيضا قناطر الاحتجاز weirs وهي عبارة عن سدود صغيرة مكونة من عدة ألواح معدنية متوازية لها جيوب لجمع السوائل بها.

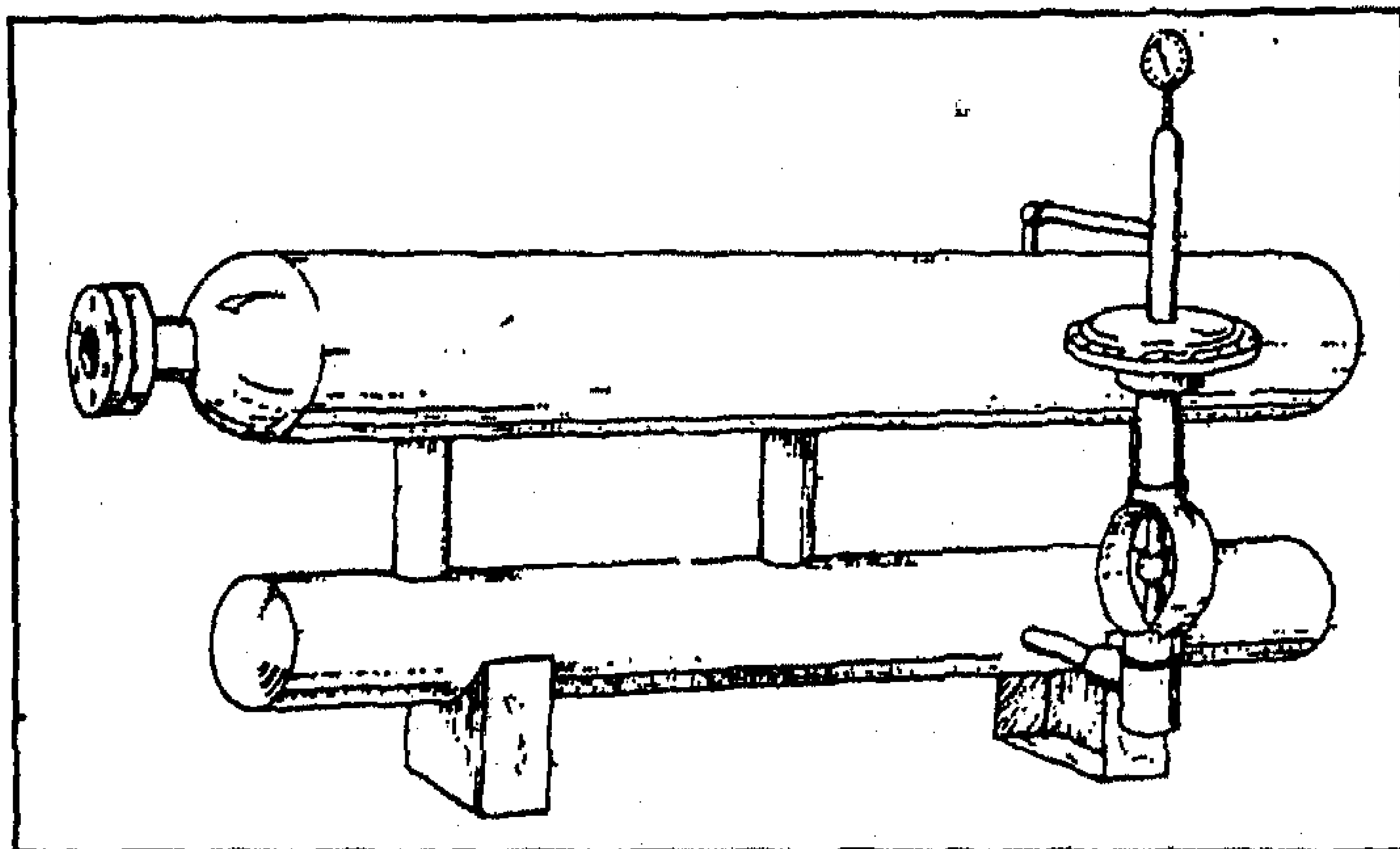
وتوجد بالفواصل وسائل للتحكم في مستويات السوائل عن طريق عوامات floats خاصة، كما يشمل التحكم في الضغط ودرجة الحرارة بالداخل، وهناك أيضاً صمام للأمان وآخر للضغط المرتد عند مخرج الغاز لضبط ضغط الغاز بالفاصل.

وفي جهاز الفصل الأفقي (شكل ٢٠-٤) ينفصل الماء عند القاع والزيت في الجزء الأوسط من الجهاز والغاز عند الجزء العلوي، وهناك مدخل للموائع القادمة وثلاثة مخارج، واحد للغاز والثاني للزيت والثالث للماء.



شكل ٢٠-٤: فاصل أفقي.

وهناك نوع آخر من أجهزة الفصل الأفقي ويعرف بالفاصل ثنائي الأنابيب double-tube separator كما هو مبين بالشكل ٢٠-٥، حيث يدخل السائل القادم إلى الوعاء العلوي ليتدفق فوق الألواح المعدنية المعدة لهذا الغرض ويتم فصل الغاز عن السوائل، وتمر السوائل بعد ذلك إلى الوعاء السفلي ليتم هناك فصل الزيت عن الماء، ويتدفق الغاز الخالي من الزيت إلى الأنبوب العلوي ويتجه الزيت الخالي من الغاز إلى الوعاء السفلي، ومن مزايا الفاصل ثنائي الأنابيب أنه يمكن عن طريقه فرز كميات كبيرة من الموائع المتتجة مقارنة بالفاصل الأحادي الوعاء.

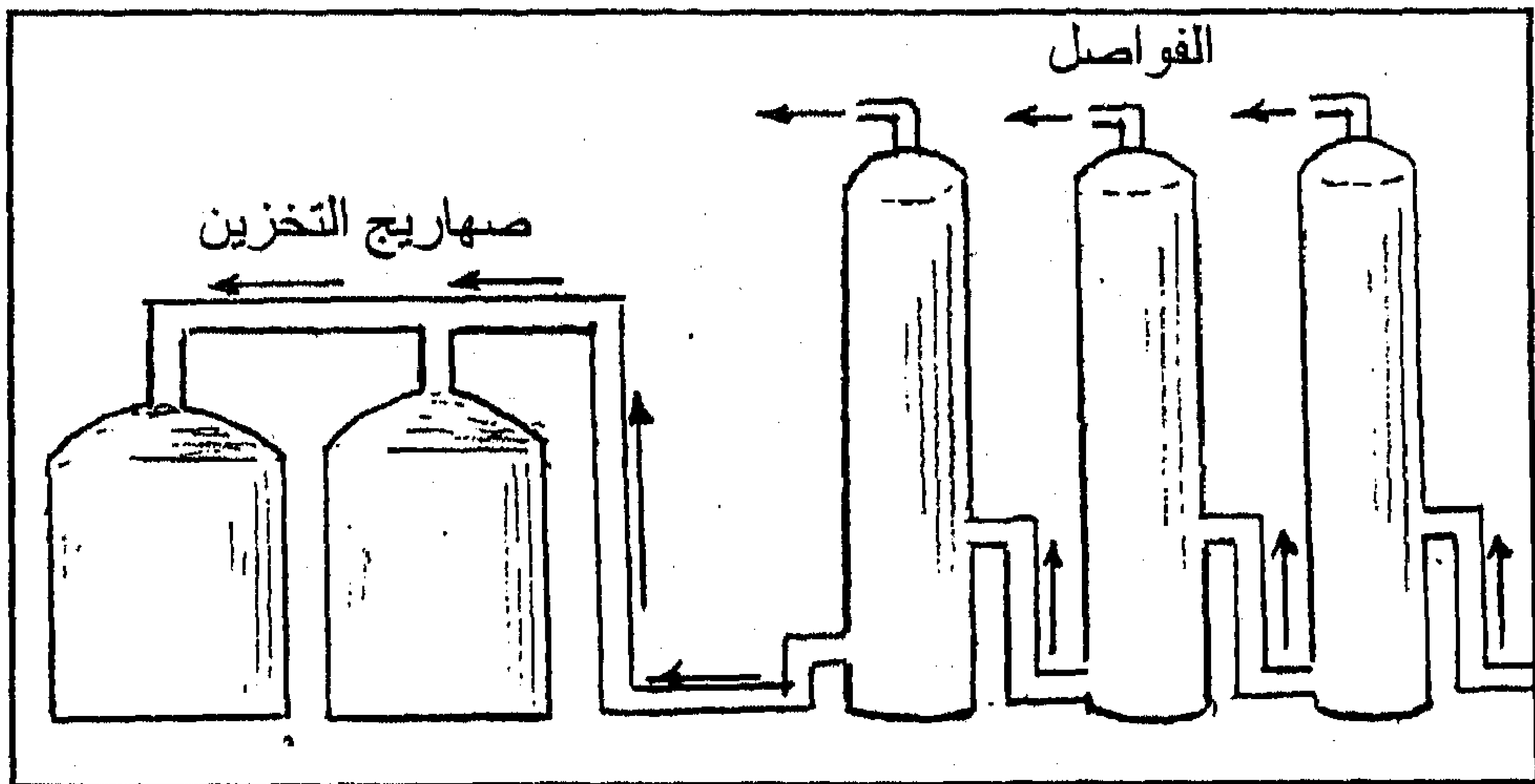


شكل ٢٠-٥: فاصل أفقي ثنائي الأنابيب.

ويتم تكسير المستحلبات عن طريق التسخين، وكل فاصل مزود بسخانات للمعالجة heater treater وهناك أنبوب لحرق الغاز fire tube ويمكن أن يكون على اتصال

بالمستحلب direct-fired أو متصل بحمام مائي يقوم بنقل الحرارة إلى المستحلب indirect-fired وفي جميع الأحوال فإن الجاذبية تعمل على فصل المستحلب الساخن.

هذا ويمكن عن طريق استخدام الأقطاب الكهربائية فصل المستحلبات، وإذا كان المستحلب غير مستقر يستخدم خزان يسمى خزان الغسل wash tank وحيث يتم الفصل بواسطة الجاذبية كما يمكن استخدام مفكك للمستحلب demulsifier مكون من مادة كيميائية تعمل على فصل المستحلب، أما بالنسبة لضغط التشغيل operating pressure لأجهزة الفصل فهو يتراوح بين ١,٥ إلى ١٥٠,٥ كيلو/ سم٢ أي ٢٠ و١٥٠٠ رطل على البوصة المربعة. ولتعظيم احتجاز المكونات المتطايرة من الزيت الخام يتم ذلك عن طريق الفصل المرحلي stock separation باستخدام عدة فواصل تعمل على ضغوط متدنية حيث تتدفق الموائع الواردة أولا إلى فواصل الضغط العالي ومنها إلى الفواصل ذات الضغوط الأدنى وهكذا، وتعتبر صهاريج التخزين storage tanks (شكل ٢٠-٦) إحدى مراحل الفصل، ويستخدم الفصل الثلاثي المراحل three-stage separation فاصلاً للضغط العالي وآخر للضغط المنخفض ومعهما صهريج التخزين، أما الفصل الرباعي المراحل four-stage فيستخدم فواصل للضغط العالي والمتوسط والمنخفض إضافة إلى صهريج التخزين (شكل ٢٠-٦)، ويعرف زمن الاحتجاز retention time بأنه الوقت الذي تمكثه الموائع داخل جهاز الفصل ويختلف من دقيقة للزيوت الخفيفة إلى خمس أو ست دقائق للزيوت الثقيلة بالنسبة للفواصل ثلاثية المراحل.



شكل ٢٠-٦: الفصل المرحلي للخام (رباعي المراحل).

معالجة الغاز:

لا يحتاج الغاز المنتج من الآبار إلى معالجات مطولة كما هو الحال بالنسبة للزيت الخام حيث يتم نقله إلى وحدة المعالجة treatment unit ويصبح بذلك جاهزاً للبيع والتصدير، ويطلق عليه الغاز المبيع sales gas، ويجب أن تتوافر في هذا الغاز المواصفات المطلوبة والمنصوص عليها في الاتفاقية الموقعة بين البائع والمشتري، ومن بين المواصفات التي تنص عليها اتفاقيات بيع الغاز: جودة الغاز ومتطلبات نقله وقيمته الحرارية وغيرها، وعادة ما لا تتغير هذه المواصفات مع القبول ببعض التجاوزات الطفيفة في الحدود التي تنص عليها الاتفاقية، وبالنسبة لجودة الغاز فإنه يجب أن يكون الغاز جافاً لدرجة كافية وأن ما يحتويه من سوائل لن يكون عرضة للتكثف أثناء نقله داخل خط الأنابيب وأن الغاز لا يحتوي على نسبة عالية من الغازات الأكّالة corrosive والضارة للبيئة مثل ثاني أكسيد الكربون والنيتروجين وكبريتيد الهيدروجين، وأن قيمته الحرارية caloric value مناسبة والتي تتراوح في العادة بين ٩٠٠ و١٠٥٠ وحدة حرارة بريطانية في القدم المكعبة (٤٩ إلى ٧٠ كجم/سم٢) كما تكون نقطة الندى dew point أقل من ٧ باسكال (عند درجة حرارة ٥ مئوية تحت الصفر)، وهي النقطة التي يتحول فيها الغاز إلى سائل عند انخفاض درجة الحرارة.

وبالطبع فإن الشوائب التي تكون بالغاز الطبيعي يجري إزالتها بما يعرف بتهيئة الغاز gas conditioning قبل أن يعرض للبيع وتسمى إزالة السوائل من الغاز بعملية الانتزاع stripping خاصة إذا كان نقل الغاز إلى مسافة طويلة حيث أن ذلك قد يعرض خطوط الأنابيب للتآكل، وانتزاع الماء dehydration من الغاز يتم إما بامتصاص الماء في محلول سائل مثل الجليكول glycol وعادة ما تستخدم مادة الجليكول ثلاثي الإيثيلين triethyline glycol أو بامتزازه في مادة صلبة مثل السيليكا أو جل gel الألومينا.

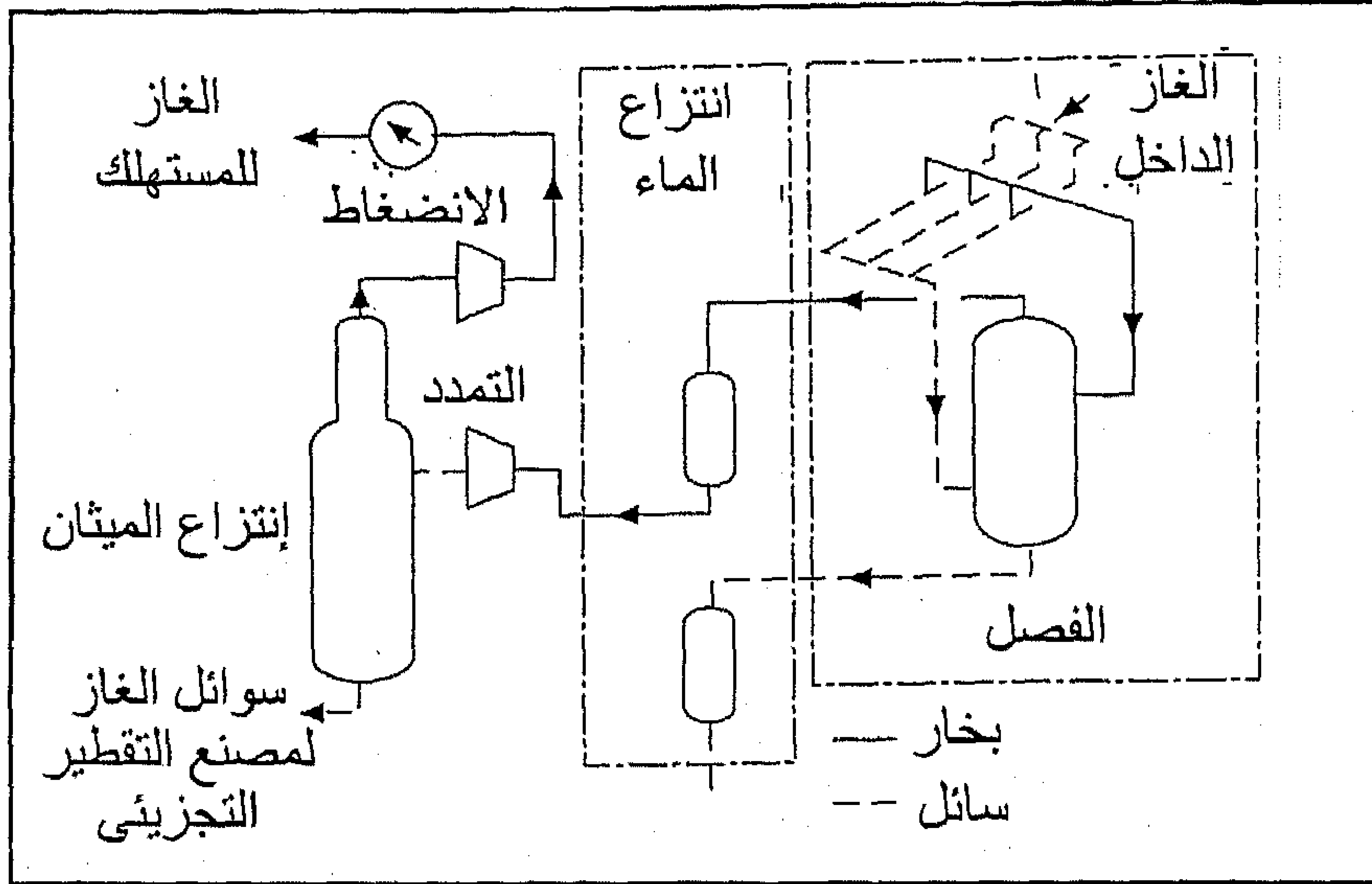
ويتم إزالة الغازات الأكالة مثل ثاني اكسيد الكربون وكبريتيد الهيدروجين والتي تعرف بالغازات الحمضية acid gases عن طريق عملية التحلية sweetening حيث يمر الغاز الطبيعي خلال وحدة التحلية والتي تحتوى عادة على مادة اسفنج الحديد iron sponge وهي عبارة عن نشارة الخشب وبرادة الحديد أو أن تحتوى على مواد كيميائية قاعدية تسمى الأمينات amines وهي مشتقات عضوية من النشادر تتفاعل بكفاءة مع هذه الغازات.

وتتطلب مواصفات الغاز المار بخطوط الأنابيب في العادة أن يكون محتوى كبريتيد الهيدروجين أقل من ٤ جزء في المليون بالحجم، ولثاني أكسيد الكربون ما بين ١ و٢ في المائة. أما الشوائب الصلبة في الغاز فتزال بواسطة مرشحات عبارة عن أسطوانات معدنية محشوة بألياف الزجاج الرفيعة للغاية.

أما اذا كان الغاز رطباً wet gas فإنه يجري إزالة ما يحتويه من السوائل الهيدروكربونية ذات القيمة الاقتصادية في مصنع الغاز gas plant إما عن طريق التبريد أو الامتصاص لإزالة المتكثفات والبيوتان والبروبان والإيثان وهي ما تعرف بسوائل الغاز الطبيعي natural gas liquids (NGL)، وكإحدى طرق التبريد استخدام وعاء التبادل الحراري heat exchanger vessel حيث يكون البروبان هو غاز التبريد (مبرد) refrigerant للغاز الرطب، كذلك فإن تمدد الغاز يعمل على تبريده، وفي هذا الشأن يعمل الفاصل ذو الحرارة المنخفضة low temperature separation كوحدة يمر خلالها الغاز عن طريق صمام خنق choke valve، كما يمكن أن يتم تبريد الغاز عن طريق توربينات بواسطة الأرياش الدوارة بها.

كما يمكن إزالة السوائل من الغاز الطبيعي بواسطة برج الامتصاص absorption tower وذلك بإمرار الغاز على صواني خاصة والذي يحتوي على سوائل هيدروكربونية خفيفة مثل الجازولين والكيروسين حيث تزال هذه السوائل ويتم فصلها عن الغاز بواسطة التقطير distillation، ويمكن أيضاً إزالة السوائل باستخدام وحدات استعادة الهيدروكربون recovery units وهي عبارة عن طبقات من السيليكا والفحم المنشط أو غرابيل من مادة الزيوليت zeolite وهو مركب من سيليكات الألومنيوم المميأة مع الصوديم أو الكالسيوم أو البوتاسيوم ويكون الغاز الطبيعي بعد إزالة السوائل منه غنياً بغاز الميثان وهو الذي يدفع عادة في خطوط الأنابيب، ويمثل الشكل ٢٠-٧ رسماً تخطيطياً لمراحل فصل الغاز الطبيعي لاستخلاص الميثان منه والذي يباع للمشتري بناء على ذلك، كما يمكن عزل البروبان C_3H_8 والبيوتان C_4H_{10} من الغاز الطبيعي ويتم بيعه ويعرف عندئذ بغاز البترول المسال liquefied petroleum gas (LPG)، أما الغاز المبيع والذي يتكون في أساسه من الميثان CH_4 ونسبة قليلة من الإيثان C_2H_6 فيمكن بيعه مبرداً داخل الناقلات refrigerated tankers بدلاً من خطوط الأنابيب حيث يتم ضغطه

وتبريده عند درجة حرارة ١٥٠ درجة مئوية تحت الصفر، ويسمى في هذه الحالة الغاز الطبيعي المسال liquefied natural gas (LNG)، أما المتكثفات condensate التي تم فصلها عن الغاز الطبيعي فيمكن الاحتفاظ بها داخل الحقل في صهاريج من الصلب تشبه كثيراً صهاريج التخزين الرئيسة للزيت المنتج ولكنها تكون بالطبع أقل حجماً.



شكل ٢٠-٧: رسم تخطيطي لمراحل فصل الغاز الطبيعي لاستخلاص الميثان.

وتستخدم الضواغط compressors لزيادة ضغط الغاز المنتج ودفعه على التدفق بسهولة، وهناك ضواغط تعرف بالضواغط ذات الإزاحة الموجبة positive displacement compressors وتعمل بها كباسات ترددية، وهناك أيضاً ضواغط القوة الطاردة المركزية centrifugal compressors ذات المحركات التي تدار بالغاز أو الكهرباء، ويوصف الضاغط بنسبة الانضغاط له compression ratio (CR) وهي حجم الغاز قبل انضغاطه إلى حجمه بعد الانضغاط (مثلا ١٠ إلى ١)، أما الضواغط ذات المراحل المتعددة multiple stage compressors فهي تلك الضواغط التي تربط إلى بعضها لكي يمكن ضغط الغاز على نسب متزايدة خاصة في حالة الضغوط العالية.

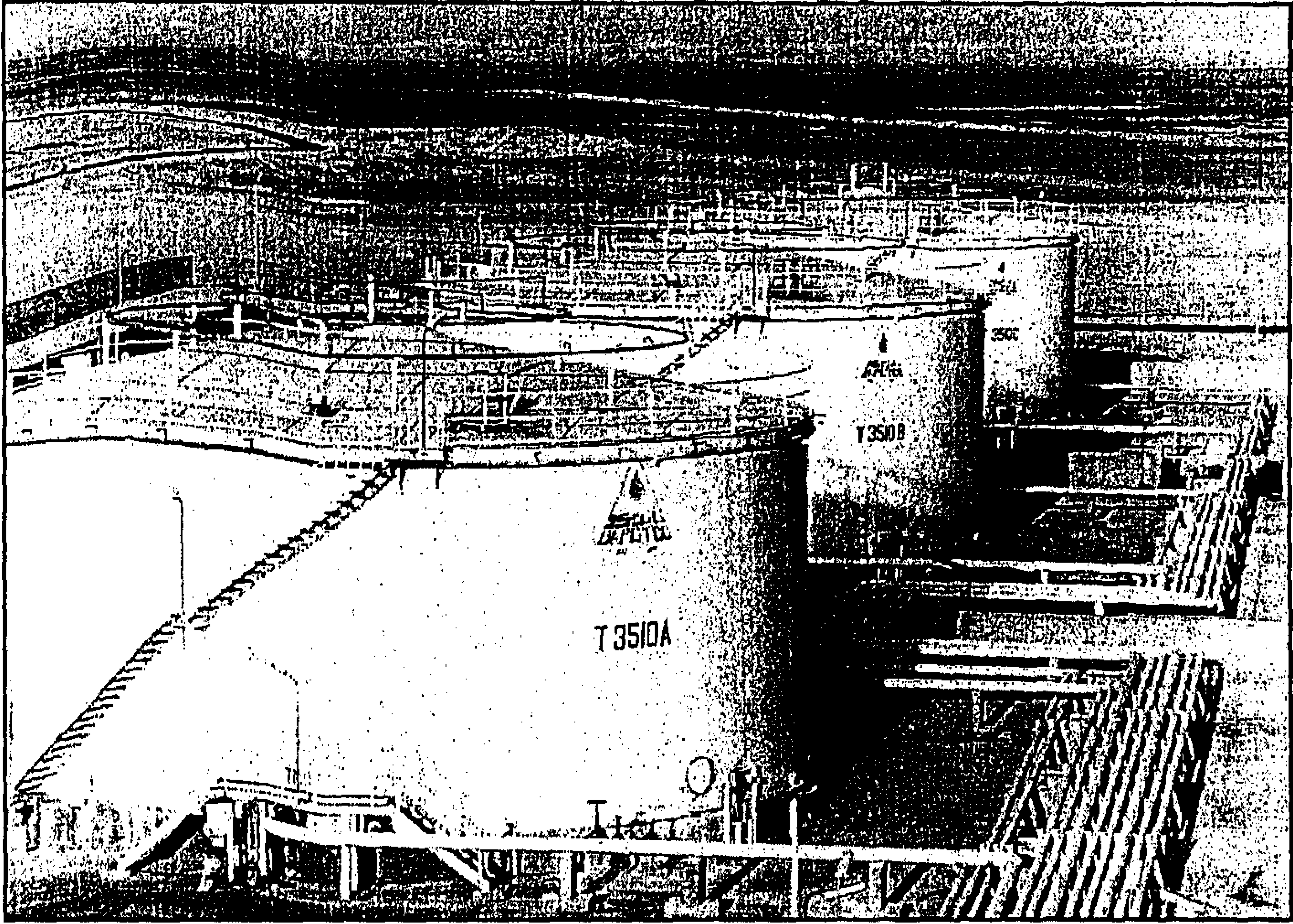
تخزين الخام والقياسات اللازمة:

بعد معالجة الزيت في الفواصل (الفرازات) يدفع هذا الزيت لتخزينه في صهاريج التخزين storage tanks (شكل ٢٠-٨)، وهي صهاريج مصنوعة من صلب كربوني على

هيئة ألواح مثبتة بمسامير أو ملحومة فيما بينها، وتتفاوت السعة التخزينية للواحد منها من ٩٠ إلى عدة آلاف من براميل الزيت، ويتم التصنيع حسب المواصفات الدولية لهذه الصهاريج.

وتتميز الصهاريج المثبتة بالمسامير بإمكانية تركيبها وإصلاحها على الموقع وهي مكونة من ألواح الصلب المجلفن والمطلي، وتشكل حسب الحجم المطلوب لها.

أما الصهاريج الملحومة فهي من النوع الجاهز ذي تخانة نصف سم (٠،١٩ بوصة) أو أكثر ويتم نقلها إلى الموقع، وللصهريج قاعدة منبسطة أو مخروطية الشكل لجمع الرواسب.



شكل ٢٠-٨: صورة أرشيفية لعدد من صهاريج التخزين بمنطقة بدر الدين بالصحراء الغربية في مصر.

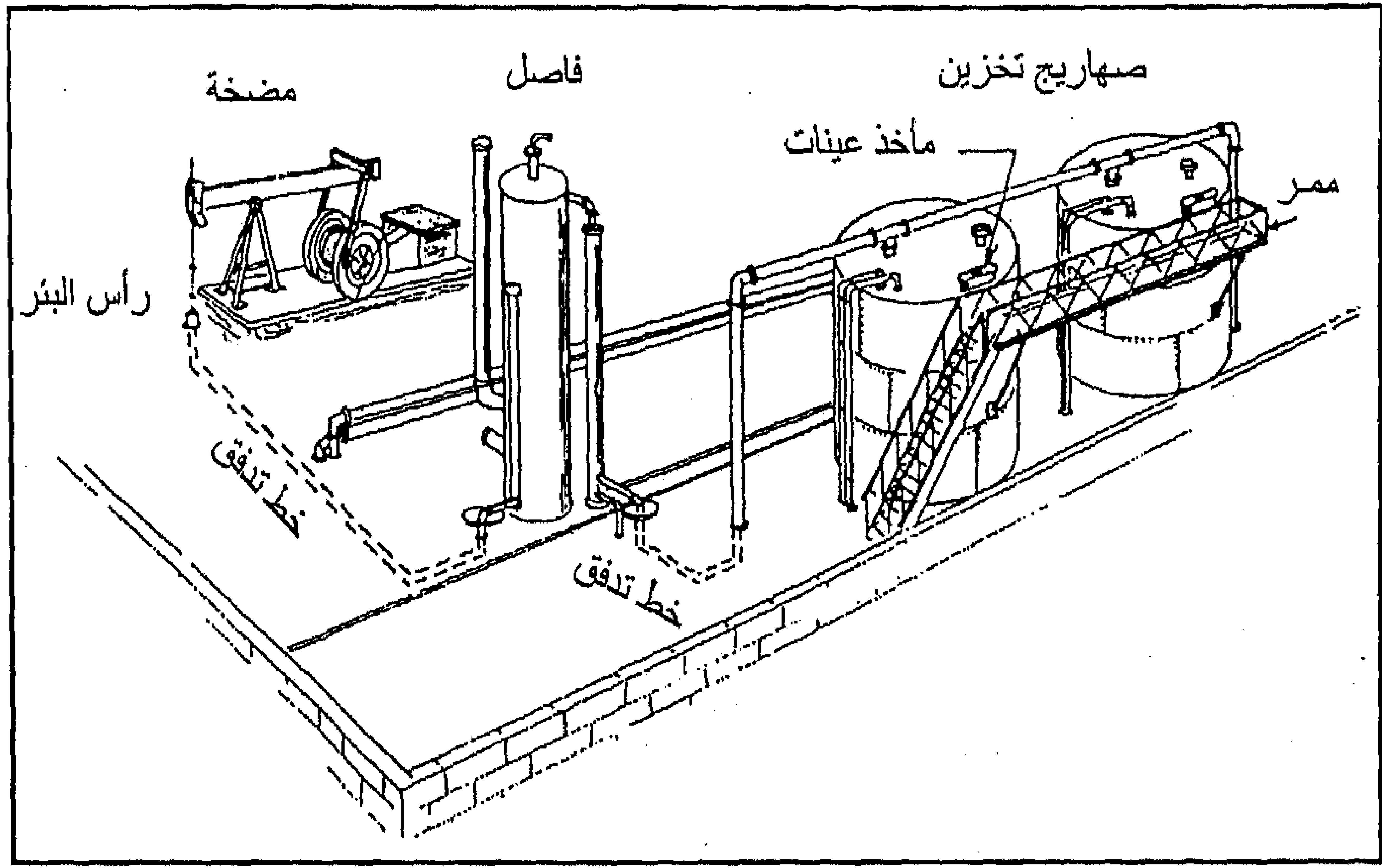
وقد تكون صهاريج التخزين عمودية أو أفقية، وتفضل الصهاريج العمودية لأكثر الأغراض وتصل سعتها إلى ١٠٠ ألف متر مكعب (٢٢ مليون جالون إنجليزي)، كذلك تستعمل الصهاريج الأفقية لاسيا في الحالات التي يطمر فيها الصهاريج، ويتراوح سعة هذه الأخيرة بين ٥٠ و٢٦٠ متراً مكعباً (١١٠٠٠ - ٥٢٠٠٠ جالون)، وفي حالة خزن منتجات لا تتطاير وترتفع فيها نقطة الوميض flash point مثل زيت الغاز وزيت

التزييت وزيت الوقود تعمل الصهاريج بضغط الجو، أما في حالة المنتجات التي تتطاير وتنخفض فيها نقطة الوميض مثل البنزين وبعض الكيماويات فإنه يلزم الاحتفاظ بقليل من الضغط في مجال البخار داخل الصهريج للتقليل من خسائر التبخر، أو كطريقة بديلة يستعمل سقف عائم أو غطاء لدن لإنهاء مجال البخار، والسقوف الثابتة للصهاريج القياسية هي مخروطية الشكل وقائمة بذاتها، أي أنها لا تستند إلى أعمدة داخلية، ويتألف السقف من ألواح من الصلب ملحومة أطرافها بعضها ببعض وقائمة على إطار معدني ولا يرتبط السقف بالصهريج إلا عند قمة الجدار، وهذا من شأنه أن يضمن أنه في حالة حدوث انفجار في الصهريج تنقلع لوحات السقف عند محيط الخزان فتعمل بذلك عمل صمام الأمان وتبعد الضرر عن إطار السقف وجدار الصهريج.

وتتكون السقوف العائمة إما من سقيفة منفردة تستند إلى عوامات أو من سقيفة مزدوجة تغطي كل الصهاريج، ويعوم السقف على سطح السائل ويعلو ويهبط حسب منسوب الصنف المخزون. ولا يلزم في العادة لصهاريج التخزين أساسات خرسانية أو حجرية حيث تقام الصهاريج عادة على أساسات بسيطة من حطام حجارة مرصوصة ومغطاة بطبقة من الرمل.

ولصهاريج التخزين نظام لاستعادة البخار vapour reverse system للحيلولة دون فقد الهيدروكربونات المتطايرة، ويتكون هذا النظام من خط لسحب الأبخرة من صهريج التخزين إلى فاصل مص suction separator يجري فيه فصل السوائل من الغاز ثم تعاد هذه السوائل إلى صهريج التخزين من جديد، ويمكن الاستفادة من الغاز المتجمع في إدارة المحركات أو دفعه مرة ثانية إلى خط الأنابيب.

وتوجد صهاريج التخزين عادة في مجموعات tank battery من ثلاث أو أربع وحدات متصلة ببعضها ويتم تعبئتها على التوالي، ويستوعب كل صهريج إنتاج أربعة أيام على الأقل، وعندما يمتلئ الصهريج يتم نقل محتواه بالشاحنات إلى معامل التكرير أو يضخ في خط الأنابيب، ويتم تصريف الزيت من الصهريج عن طريق مخرج خاص يعلو عن القاع بحوالي قدم، ويمثل الشكل ٢٠-٩ رسماً تخطيطياً للتسهيلات الحقلية من مضخات وخطوط تدفق وفواصل وصهاريج لتخزين الخام.



شكل ٢٠-٩: رسم تخطيطي للتسهيلات الحقلية لإنتاج البترول.

وبجانب عملية التخزين هناك قياس دوري لمعرفة كمية وجودة الزيت الموجود بالصهريج وذلك عن طريق غمس شريط للقياس gauge tape مزود في نهايته بثقل معدني حتى يحافظ على استقامة الشريط أثناء إنزاله، وبمعرفة هذا الارتفاع يمكن حساب كمية الزيت المختزنة، ومن ناحية أخرى يمكن أخذ عينات من الزيت داخل الصهريج عن طريق وعاء من الزجاج مخصص لهذا الغرض.

كما تقاس درجة حرارة عينة الزيت بالإضافة إلى اختبار معملي على هذه العينة بوضعها داخل أنبوب زجاجي تحت تأثير حركة اهتزازية تعمل بالضغط المركزي حيث ينفصل الراسب والماء في قاع الأنبوب أما الزيت فيصعد أعلى الأنبوب، ويطلق على شوائب الزيت بالراسب الأساسي والماء basic sediment and water (BS & W)، وفي الزيت المضخ داخل خطوط الأنابيب أو المعد لنقله إلى معامل التكرير لا ينبغي أن تزيد نسبة BS & W عن واحد في المائة.

كذلك تؤخذ عينات من الغاز لاختبارها وإجراء بعض القياسات التي تشمل الانضغاط واختبار الفحم النباتي والتحليل التجزيئي، ويتم اختبار الانضغاط compression test بواسطة ضاغط ومبرد للغاز لإزالة وقياس كمية المتكثفات بالغاز،

ويقوم اختبار الفحم charcoal test أيضاً بقياس كمية المتكثفات عن طريق إمرار الغاز على فحم منشط حيث يعمل الفحم على امتصاص المتكثفات من الغاز، أما بالنسبة للتحليل التجزيئي fractional analysis فيجري ذلك عن طريق التحليل والفصل الكروماتوجرافي، ويتضمن هذا التحليل تعيين نسبة الهيدروكربون والماء والقيمة الحرارية لغاز البروبان والمكونات الأعلى بالغاز الطبيعي مقدرة بعدد الجالونات في الألف قدم المكعبة.

أما حجم الغاز فيقاس بمقياس خاص على خط الأنابيب، ويتم القياس عن طريق معرفة الفرق في ضغط الغاز الداخل إلى فتحة المقياس والضغط الخارج من الناحية الأخرى باستخدام مقياس التدفق الفوهي orifice gas meter، وكلما كان معدل التدفق عالياً كان الهبوط في الضغط كبيراً، كما أنه يمكن قياس سرعة الغاز عن طريق جهاز خاص ومقارنة هذه السرعة بتلك المقاسة لنفس الحجم من غاز تمت معايرته.

وفي آبار الغاز الحديثة هناك تجهيزات لمراقبة أداء الآبار وكمية الغاز الواردة وتعرف هذه الإجراءات بالقياسات الإلكترونية للتدفق (EFM) electronic flow measurements وعادة ما يتم ادارتها باستخدام الطاقة الشمسية على الآبار.

وفي حقول البترول يكون مراقب عام الحقل field superintendent هو المسؤول عن إنتاج الحقل وهو الذي يعطي أوامره لأفراد طاقم الإنتاج production foremen، وفي الآونة الأخيرة أدخلت تحسينات كبيرة على أسلوب الأداء بالحقول حيث يتم جمع البيانات ومراقبة آبار الزيت والغاز باستخدام الشبكة العنكبوتية (الإنترنت) internet وتشمل المعلومات معدلات الإنتاج وحالة الضواغط ومستوى السوائل في صهاريج التخزين والضغط داخل أنابيب الإنتاج والقيسون، وتجرى القياسات آلياً ويمكن ذلك بواسطة استخدام وحدات الطاقة الشمسية المثبتة عند مواقع الآبار، كما أنه بالإمكان إرسال البيانات بطريقة آلية أو بناء على طلبها بواسطة خطوط الهاتف أو الأقمار الاصطناعية حيث تتوافر بالتالي هذه البيانات للمتعاملين معها والإدارات المعنية، ومن خلال هذه المنظومة يمكن إخطار المسئولين عن حالة سير العمل بالحقول من حيث المعدل اليومي للإنتاج أو ربما توقف بعض الأجهزة عن العمل وطلب النصيحة والمشورة في هذا الشأن من الإدارة المركزية للشركة أو المنشأة للحيلولة دون تعطل الإنتاج وتأثر الأداء.

الفصل الحادي والعشرون

الحفر البحري ومنصات الإنتاج

حتى أواسط القرن الماضي لم يكن هناك اهتمام كبير بالحفر البحري بحثاً عن البترول والغاز الطبيعي في الأحواض الترسيبية الموجودة في المناطق المغمورة بالمياه فقد كان التركيز على حفر الآبار على اليابسة حيث الأمان وسهولة العمل نسبياً لكنه مع التقدم التكنولوجي والدراسات الجيوفيزيائية والبيئية المتقدمة اتجهت معظم الشركات العاملة في مجال البحث والتنقيب عن البترول والغاز إلى مد نشاطها إلى المناطق البحرية خاصة بعد أن أكدت الدراسات وجود امتدادات طبيعية للمصايد البترولية هناك وتحققت بالفعل انجازات عديدة في العالم كما في مياه سواحل كاليفورنيا والمكسيك وسواحل ألاسكا والشرق الأوسط وبحر الصين وسواحل أستراليا وإفريقيا وخليج السويس وبحر الشمال وغيرها، ولقد كان الحفر في البداية في المياه الضحلة (٥٠٠ قدم) ولكن مع تقدم التكنولوجيا وإنشاء منصات الحفر العملاقة امتدت أعمال الحفر بعيداً عن الساحل إلى أكثر من ٢٠٠ كيلومتر داخل المياه، وكذا حفر الآبار في مياه عميقة تجاوزت ٢٥٠٠ متر، وعرفت بالمياه الفائقة العمق ultra deep water والتي تخطت في الآونة الأخيرة الـ ٤٠٠٠ متر، وبالطبع فإن تكلفة حفر الآبار البحرية تفوق مثيلاتها في اليابسة ولكنها تتشابه في أغلبها لكن الاختلاف أساساً في أسلوب الدفع لسلسلة أنابيب الحفر حيث يغلب الدفع من أعلى لمثقب الحفر على الأجهزة البحرية بالإضافة إلى بناء المنصات الحديثة المتينة الدعائم والقوية البنيان والقادرة على مقاومة العواصف البحرية وتجنب الأضرار التي تلحقها الأمواج أثناء الطقس العاصف.

نظام الدفع من أعلى:

تتشابه أجهزة الحفر التي تعمل في البحر ومثيلاتها على اليابسة ولكن الفارق الرئيس هو نظام تشغيل سلسلة أنابيب الحفر حيث يكون على اليابسة في أغلبه بواسطة الطاولة الدوارة وجلبة الحفر الدوارة، أما في الحفر البحري تكون الحركة الدوارة عن طريق الدفع من أعلى top drive (راجع شكل ١٤-٥)، وهذه الآلة عبارة عن جلبة swivel دوارة توجد أسفل البكرة المتحركة التي تدفع سلسلة أنابيب الحفر، وتتكون من محرك كهربائي أو هيدروليكي يولد طاقة تزيد على ١٠٠٠ قدرة حصانية (٣٣ ألف رطل قدم في الدقيقة

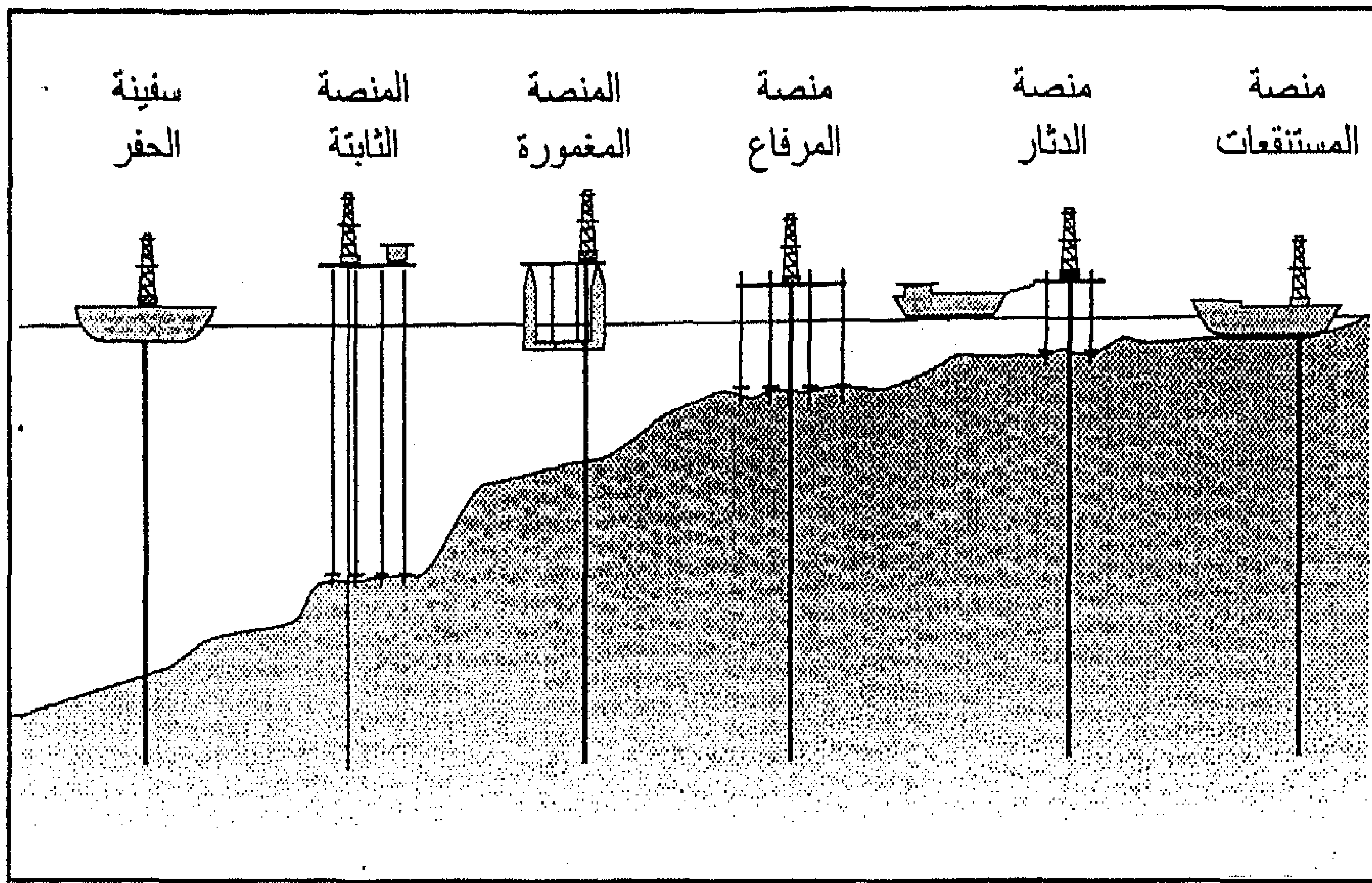
أو ٧٣٥،٥ وات). وتتعلق الآلة بخطاف على البكرة المتحركة وتدير عموداً يرتبط بسلسلة أنابيب الحفر وتتحرك إلى أعلى وأسفل قضبان عمودية لمنعها من التمايل والانحراف عند حدوث تأثيرات خارجية كما سبق أن أوضحنا، ويتتابع ربط كل ثلاث وصلات من أنبوب الحفر إلى السلسلة الرئيسة ومن شأن وجود الدفع من أعلى تسهيل عملية إضافة الوصلات على غير ما هو في حالة الحفر الدوار الذي يتطلب جهداً ووقتاً أكثر. كذلك فقد أدخلت في الآونة الأخيرة تقنية حديثة تتعلق بكيفية ربط وفك وصف أنابيب الحفر دون تدخل بشري وعضلي الأمر الذي سوف يحدث طفرة كبيرة في تقليص المدة الزمنية لحفر الآبار وإنجازها في زمن حقيقي

طاقم الحفر البحري:

يتألف طاقم الحفر العاملين في الحفر البحري من ثلاثة مجموعات اثنتان متواجدتان على منصة الحفر والثالثة متواجدة في القاعدة على الشاطئ، وتتناوب المجموعات الثلاث مرة كل أسبوعين وتحدد ساعات العمل بـ ١٢ ساعة يوميا، وطاقم الحفر متعدد المؤهلات والوظائف وكما هو الحال في أعمال الحفر على اليابسة هناك مراقب عام الحفر وكبير الحفارين والحفار ومساعد الحفار وفني برج الحفر ومشغلو المحركات والمضخات والروافع ومسئول سائل الحفر وعاملون آخرون مسئولون عن أعمال الصيانة والتشغيل من الميكانيكيين والكهربائيين وعمال النظافة وغيرهم، وإذا كان العمل على جهاز الحفر كبيراً (قد يصل إجمالي العاملين إلى نحو ٢٠٠ فرد)، وإذا كانت المنصة قريبة من الشاطئ يتم نقل العاملين إلى الموقع ومنه بواسطة زوارق معدة لهذا الغرض، وفي أحيان كثيرة يكون نقل العاملين بواسطة الطائرات العمودية (الهليكوبتر) حيث ترسو على مدرج خاص على سطح المنصة.

منصات الحفر البحري:

تتعدد أنواع منصات الحفر في الاستكشاف البحري ويتوقف ذلك على عدة عوامل منها تكلفة جهاز الحفر ومدى توافره، عمق الماء في الموقع المخطط، تحرك وكيفية نقل الجهاز من وإلى الموقع، عمق الخزان الجوفي المستهدف والضغط داخله، الأحوال الجوية السائدة بالموقع وكفاءة طاقم الحفر وسجلاته في الحفاظ على البيئة والسلامة، ويمثل الشكل ٢١-١ رسوماً تخطيطية لأنواع المنصات البحرية المختلفة وفيما يلي شروح مختصرة لتلك المنصات:



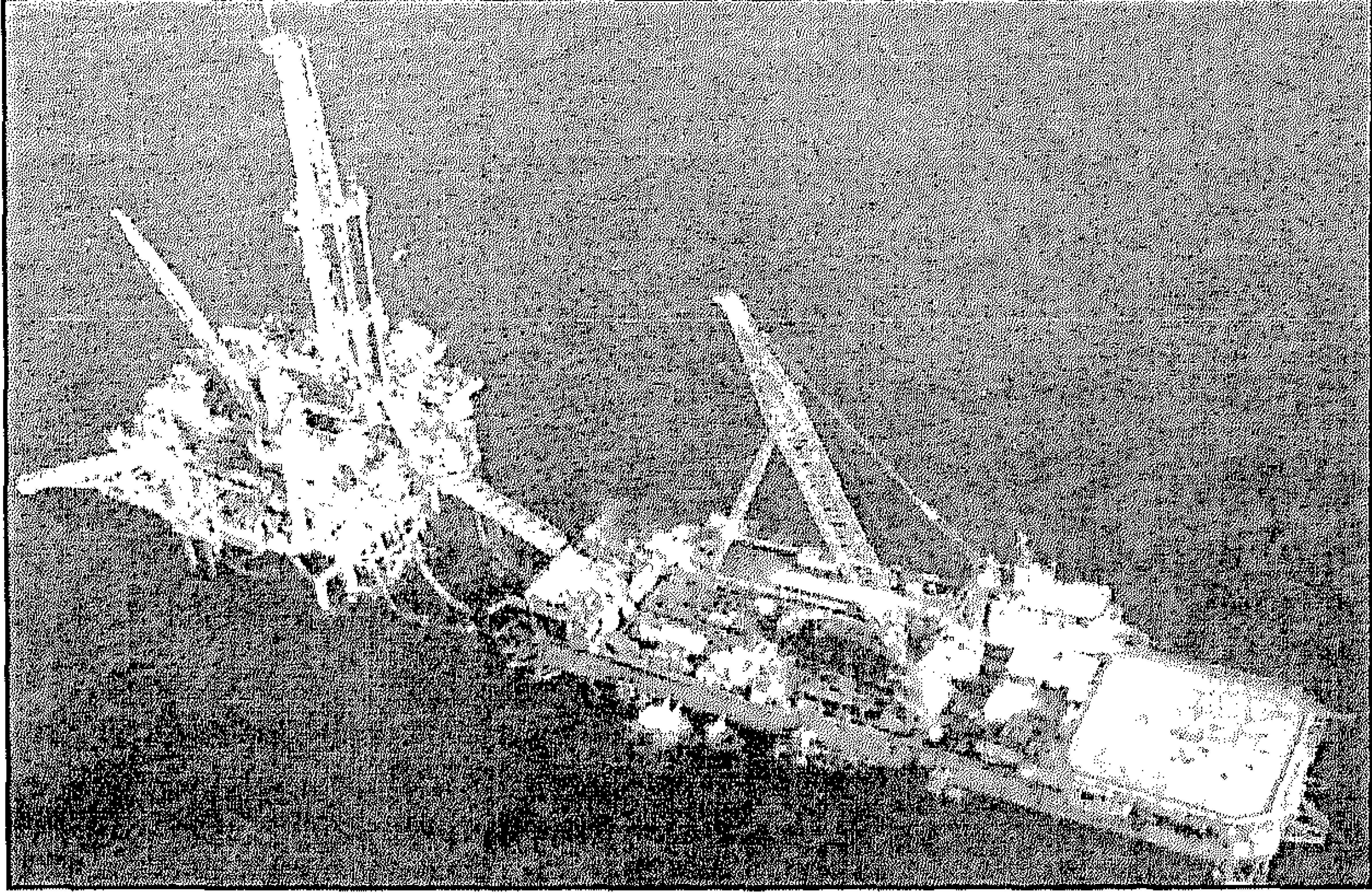
شكل ٢١-١: رسم تخطيطي لأنواع المنصات البحرية المختلفة.

- **منصات المستنقعات:**

تعمل منصات المستنقعات swamp barges في المياه الضحلة للغاية (أقل من ٧ أمتار) ويمكن جر المنصة إلى الموقع داخل المنطقة المغمورة بالمياه حيث يتم تثبيتها على صابورة ballast في القاع حتى يمكن للمنصة حمل برج الحفر والأجهزة الرافعة والمحركات، ويربط بهذه المنصة مركب لتموين مستلزمات الحفر، ويكثر استخدام هذا النوع من المنصات في مناطق المستنقعات بنيجيريا.

- **منصات الدثار:**

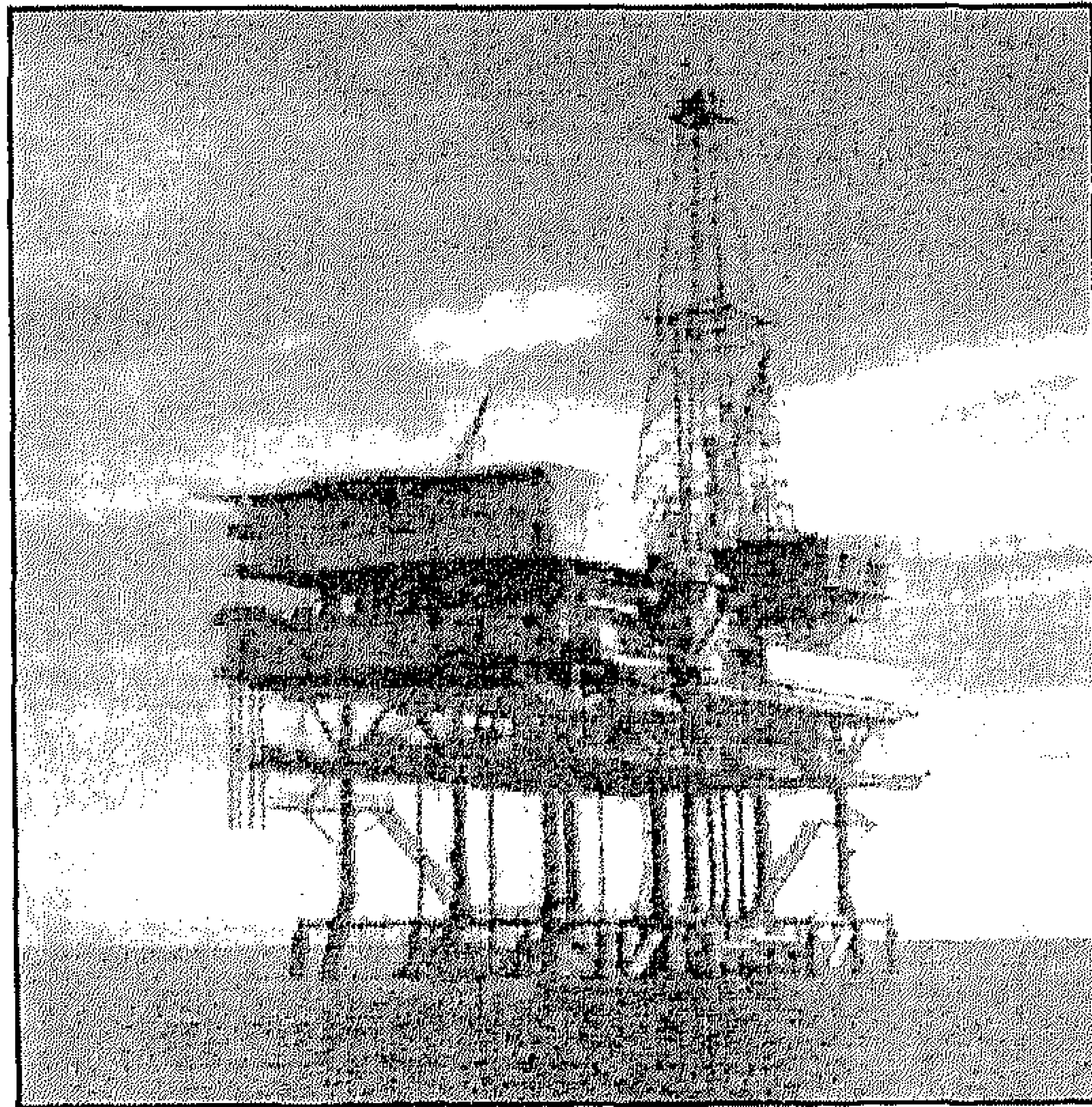
منصات الدثار drilling jackets هي من المنصات الصغيرة الحجم التي يمكن استخدامها في المياه الضحلة والبعيدة عن العواصف البحرية ولا تحمل هذه المنصات سوى برج الحفر والمعدات المشاركة (شكل ٢١-٢)، وقد لا تحتاج إلى مركب تموين ويمكن لها حفر مجموعة من الآبار الإنهائية المائلة، وبعد إكمال حفر الآبار تستعمل هذه المنصة أحيانا لتركيب معدات الإنتاج عليها كصهاريج التخزين والمضخات لنقل الزيت المنتج إلى المراكب أو إلى منشآت على الشواطئ عبر خطوط أنابيب مغمورة، ويكثر هذا النوع من المنصات في مياه جنوب الصين وخليج المكسيك وبحر الشمال.



شكل ٢١-٢: منصة الدثار ومركب تموين.

- **المنصات المتنقلة:**

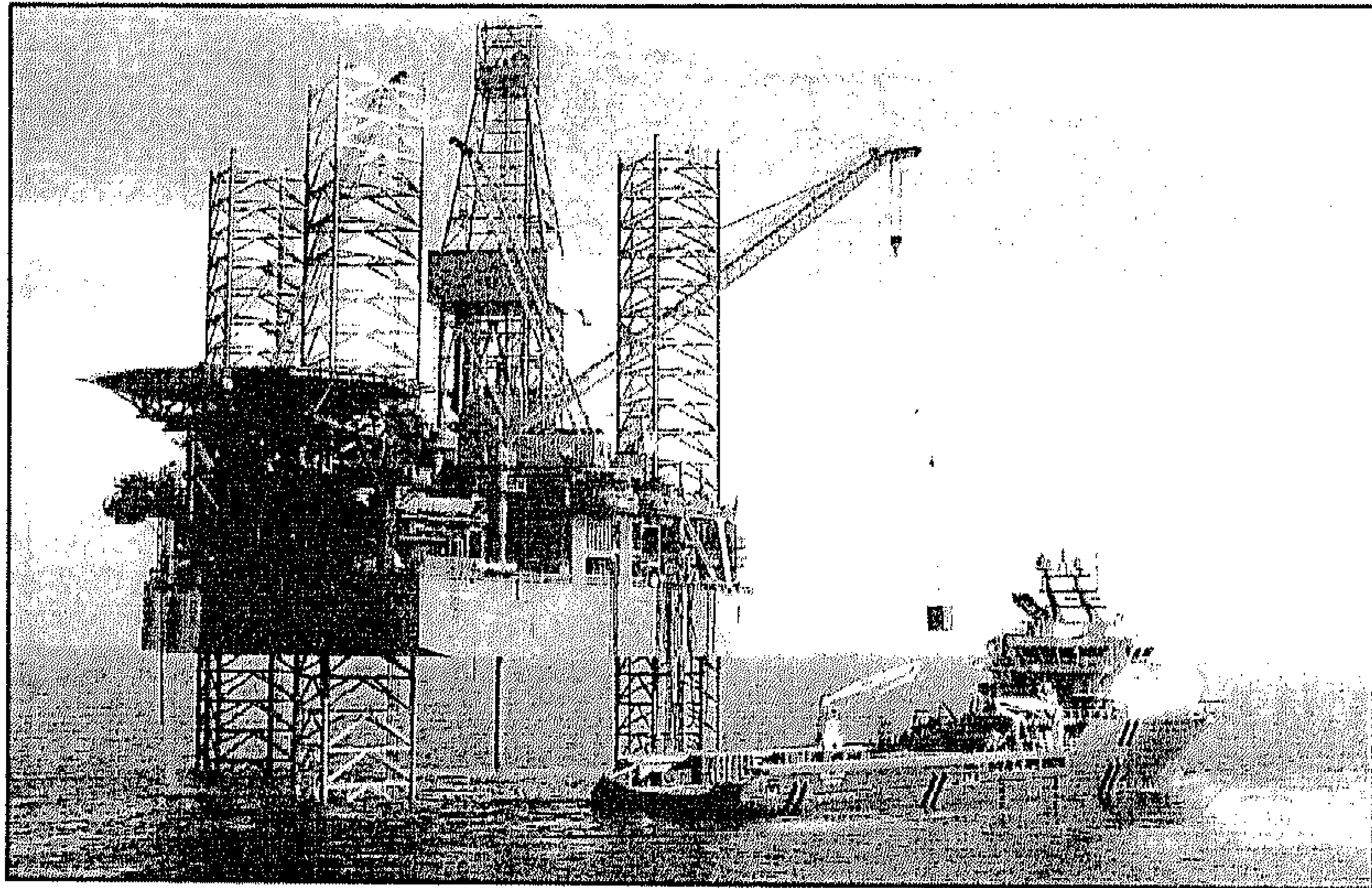
نظرا للتكلفة الباهظة وإلى العيوب التي تشوب أعمال المنصات الثابتة posted platforms (شكل ٢١-٣) ذات مراكب التموين أخذ يزداد استعمال منصات متنقلة mobile drilling platforms تستبقي منشأة الحفر كلها في مكانها ويمكن جرها من موقع إلى آخر للحفر الاستكشافي والإنمائي حتى عمق ٢٠٠ متر (٦٥٠ قدما) على الرغم من أن المنصات المتنقلة غالباً ما تكون أكثر كلفة من غيرها، ومن المنصات المتنقلة منصات المرفاع والمنصات المغمورة ومراكب الحفر.



شكل ٢١-٣: المنصة الثابتة.

- **منصات المرفاع:**

منصات المرفاع jack-up rigs هي وحدات من المنصات المتنقلة وأكثرها استخداما على المستوى العالمي لفاعليتها الكبيرة تحت الظروف البيئية والفنية المتباينة، وتتكون المنصة من هيكل structure عائم يستخدم أيضا كسطح للعمل (شكل ٢١-٤)، ويقام على هذا السطح برج الحفر والدعائم والآلات الرافعة وحوامل الأنابيب وأنابيب التغليف ومساكن عمال الورش ومدرج الطائرة الهليكوبتر، أما معمل الكهرباء الرئيس ومعمل الإنارة ومضخات الطين وغيرها من المعدات فيتم تركيبها في بيت السطح وفي داخل الهيكل. وهناك عدد (٣-٦) من الأعمدة الفولاذية المجوفة الكبيرة hulls يصل ارتفاعها إلى نحو ١٧٠ متراً وتمر عبر فتحات تخترق الهيكل عند الزوايا وعلى الجانبين وتتولى تروس صغيرة تدار بالكهرباء وتسير على حمالات مربوطة بالأعمدة إنزال هذه الأعمدة في الماء لاختراق قاع البحر ولرفع الهيكل فوق الماء حتى يصبح في وضع الحفر وتخفض المنصة وتزاح بعكس هذه العملية، ويجري في الوقت الحاضر بناء منصات متنقلة من هذا النوع الذي يدفع المرفاع للعمل في مياه يصل عمقها إلى أكثر من ٢٠٠ متر.



شكل ٢١-٤: منصة مرفاع بمنطقة امتياز دمياط البحرية في مصر وبجوارها مركب إمداد.

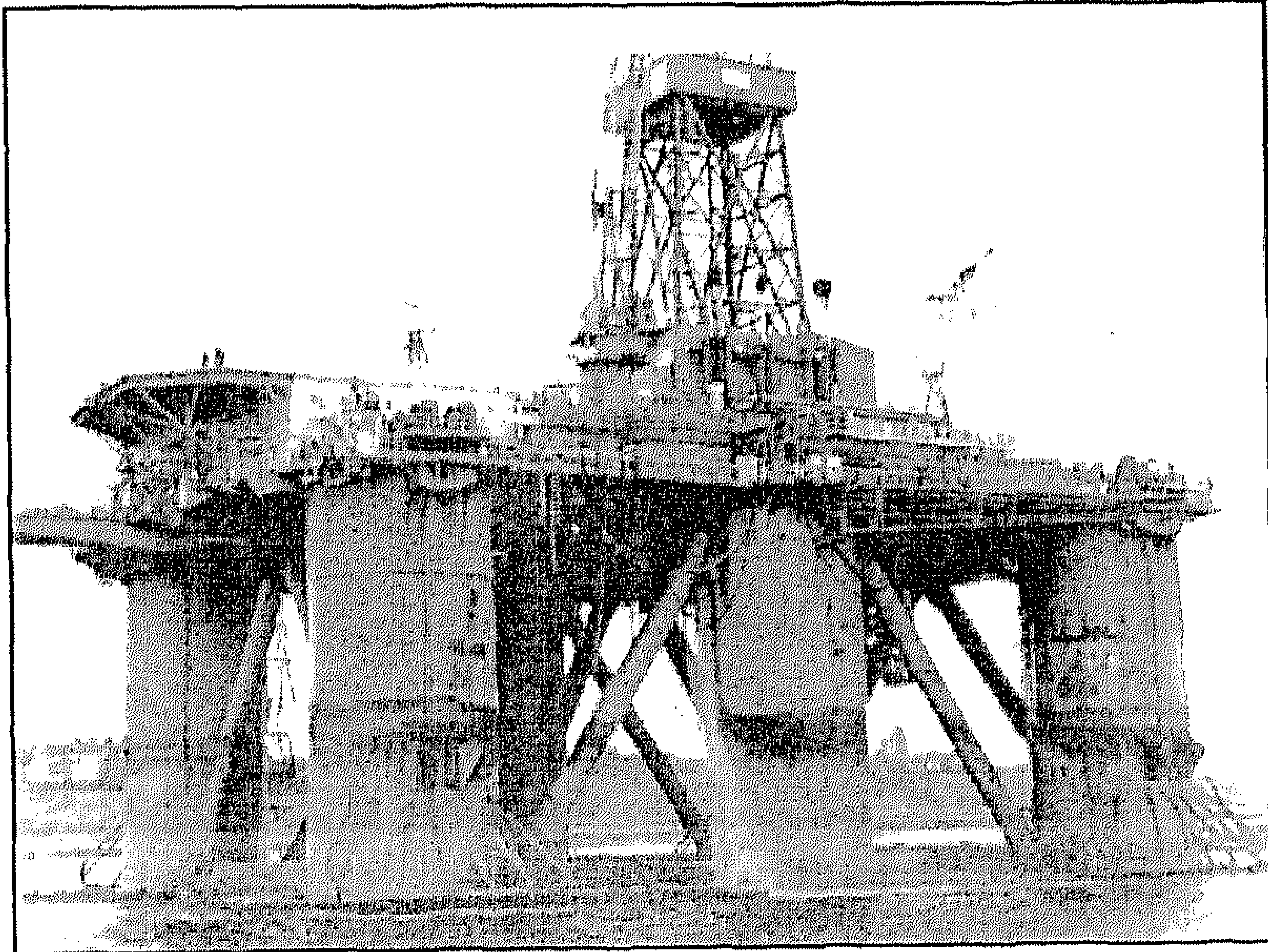
- **المنصات شبه المغمورة:**

تتكون المنصات المغمورة semi-submersible rigs (شكل ٢١-٥) من وحدات نصف مغمورة في الماء، وعندما تكون في وضع الحفر يغمر هيكلها إلى نحو ١٢-٢٤ متراً

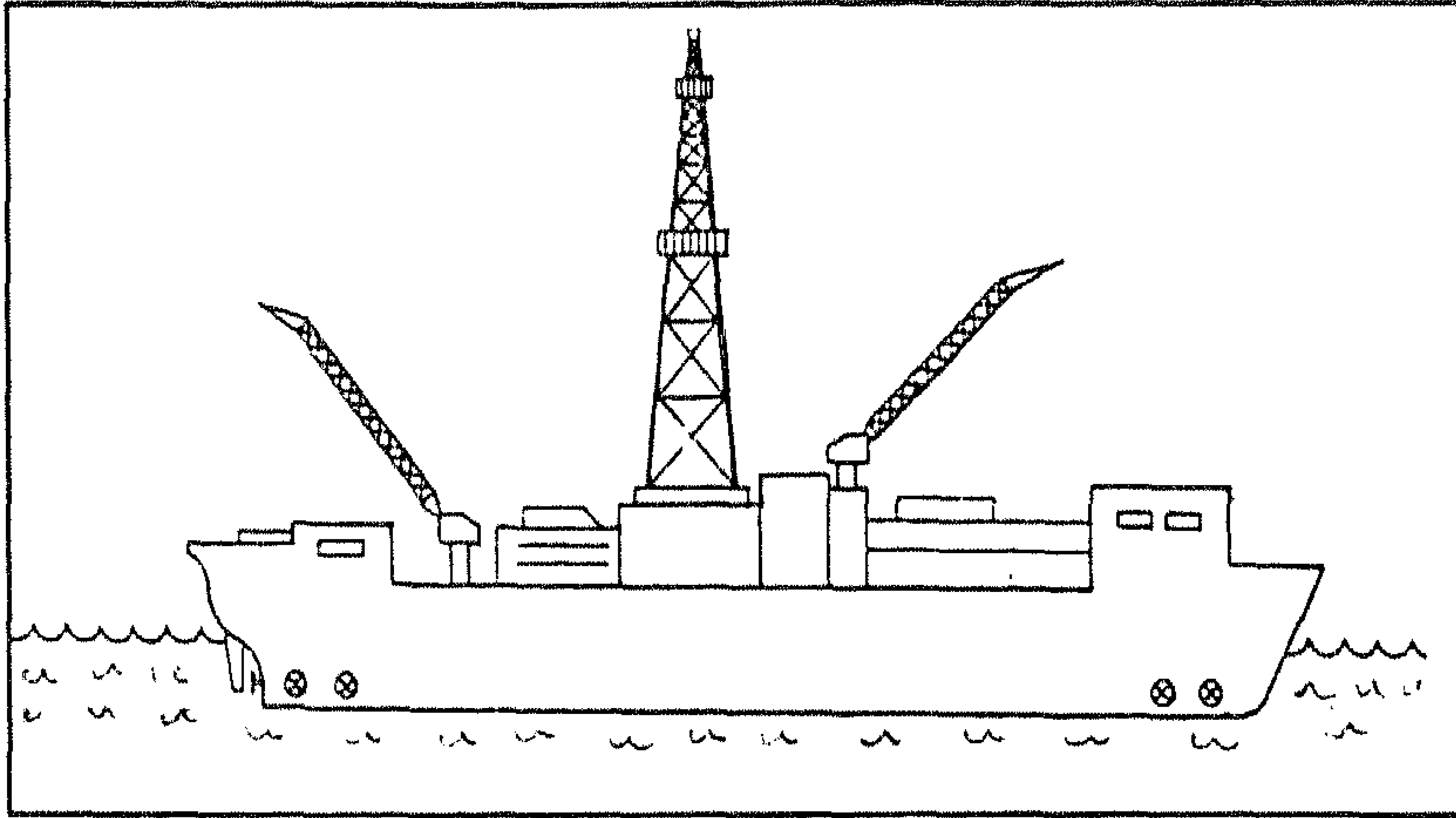
(٤٠-٨٠ قدماً)، ويتم الطفو التوازني بواسطة أعمدة زاوية كبيرة تشبه القناني في شكلها تدعم السطح الذي يجري فيه العمل فوق الهيكل (شكل ٢١-٥)، ويتم وضع المنصة العائمة في مكانها المخصص لها بواسطة المراسي anchors العادية أو بواسطة نظام دفع خاضع للتحكم الأوتوماتيكي، وميزة هذه المنصات أنها مناسبة للحفر في مياه يصل عمقها إلى عده آلاف من الأقدام، ويقضي الحفر من المنصات العائمة استخدام فوهات آبار مغمورة تقام عادة على أرض البحر وتدار إما كلياً من السطح أو بمعاونة غطاسين ولابد من توفير أجهزة إرشاد لترشد معدات الحفر إلى جوف البئر، ونظراً لاستقرار وثبات هذا النوع من المنصات فإنها تعتبر سفناً مناسبة للعمل تحت الظروف البيئية القاسية.

- **سفن الحفر:**

سفن الحفر drill-ships هي نوع آخر من المنصات المتنقلة التي تستخدم في المياه العميقة والمناطق النائية وهي مزودة بجهاز حفر مثبت في وسط السفينة، ويتم تثبيت المنصة ديناميكيا بواسطة أجهزه دسرthrusters يجري التحكم فيها عن طريق الحاسوب (شكل ٢١-٦)، وتتميز هذه السفن بسعتها التخزينية الكبيرة مما يؤهلها للتشغيل لفترات زمنية طويلة دون الحاجة إلى إمدادات إضافية، لذلك فإنه توجد أنواع من سفن الحفر قادرة على حفر الآبار العميقة والتي قد تصل إلى عمق ١٠٧٠٠ متر (٣٥ ألف قدم).



شكل ٢١-٥: منصة حفر شبه مغمورة.



شكل ٢١-٦: رسم تخطيطي لسفينة الحفر.

مراكب التموين على المنصات:

في بعض الأحيان يتم تنمية حقول الزيت والغاز من خلال عدد من المنصات والتي يمكن لها استيعاب تسهيلات الإنتاج والمعالجة ووحدات إعاشة العاملين، ومن ناحية أخرى فإن هذه المرافق يمكن إقامتها على منصات منفصلة خاصة في ظروف الحفر في المياه الضحلة والهادئة، وبالطبع فإن بناء كل هذه الهياكل البحرية وإقامتها سيكون مكلفاً، ولما كان الحفر يتم خلال فترة زمنية محدودة فإنه يكون من المفيد والأوفر أن يتم إقامة هذه المرافق بمفردها عند الحاجه إليها، وهذا هو المبدأ الذي قامت عليه عمليات الحفر المزودة بمراكب التموين tenders حيث يتم إنشاء صهاريج التخزين وخزانات الطين ووحدات الإيواء وغيرها على مركب منفصل بجوار موقع الحفر ومن ثم يمكن تقديم الخدمات اللازمة للحقل بل لعدة حقول باستخدام مركب أو مركبين للتموين (راجع شكل ٢١-٢)، إلا أنه في بعض الأحوال التي يغلب عليها الطقس السيئ والعواصف العاتية حيث تكون مراكب التموين مهتزة وغير آمنة في حين تكون المنصة بطبيعة تركيبها مستقرة ومقاومة لذلك الطقس القاسي يمكن أن يشمل هيكل المنصة العائمة المرافق المعاونة (خزانات الطين وتسهيلات الإنتاج ووحدات الإيواء وغيرها) والتي كانت تحملها مراكب التموين، وهو ما يمكن أن نشاهده في حقول بحر الشمال حيث يشيع هذا الأسلوب في العمل هناك.

الآبار الاستكشافية البحرية:

تكون بداية الحفر بوضع القيسون المرشد (الناقل) conductor casing أسفل قاع البحر وتختلف الطريقة باختلاف نوعية تربة قاع البحر وكذلك نوع جهاز الحفر المستخدم، فإذا كان الحفر مثلاً من منصة عائمة كمنصة المرفاع تكون طريقة وضع القيسون والذي يمتد طوله عادة إلى مئات الأقدام وبقطر ٦٦ أو ٧٦ سم (٢٦ أو٣٠ بوصة) حسب نوع تربة القاع، فإذا كانت هذه التربة رخوة للغاية يتم تركيب القيسون بواسطة دفع نفاث لماء البحر داخل الأنبوب مما يسهل اختراق القيسون لتلك التربة، أما إذا كانت أشد صلابة فيمكن استخدام أسلوب دق الخوازيق لهذا الغرض، أما إذا كانت التربة شديدة الصلابة فيجري حفرها بالأسلوب المعتاد في الآبار الأرضية وتثبيت القيسون وسمنتته بعد ذلك.

ويمتد القيسون المرشد فوق منسوب سطح البحر حتى أسفل سطح المنصة، وبعد ذلك يبدأ الشروع في حفر ثقب أقل قطراً من القيسون المرشد ليمتد مئات الأقدام أسفل قاع هذا القيسون، ثم يجري إنزال القيسون السطحي وسمنتته، ويلي ذلك تركيب صمام مانع التفجر عند قمة القيسون السطحي، وتتواصل بعد ذلك عملية الحفر حسب البرنامج المخصص لها وبشكل مماثل لحفر الآبار الأرضية.

أما إذا كانت المنصة البحرية من المنصات المغمورة أو سفن الحفر فيلزم في البداية تثبيت قاعدة مرشدة ومؤقتة temporary guide base على قاع البحر وهي عبارة عن هيكل من الصلب سداسي الشكل ذي ثقب (فتحة) في وسطه وهو متصل بسلسلة أنابيب الحفر ويتم تدليته إلى قاع البحر. ويمتد من جوانب هذا الهيكل أربعة خطوط دليلية حتى سطح السفينة وتساعد هذه الخطوط في إنزال التجهيزات الأخرى ووضعها داخل البئر أو رفعها منه عندئذ ترفع سلسلة أنابيب الحفر إلى السطح تاركة القاعدة المرشدة بقاع البحر ويوصل الجزء السفلي من السلسلة بإطار مرشد guide frame له ذراعان أو أربعة أذرع تمر خلالها الخطوط المرشدة ثم تدلى السلسلة والإطار إلى القاعدة المرشدة، ويبدأ بعد ذلك حفر البئر بقطر ٧٦ أو ٩١ سم (٣٦ أو ٧٦ بوصة) في وسط القاعدة إلى حوالي ٣٠ متراً (١٠٠ قدم) تحت قاع البحر ثم ترفع بعد ذلك سلسلة الحفر والإطار من جديد إلى السطح ويربط الإطار بالوصلة السفلى على ركيزة الأساس وهي أول قيسون يجري داخل

البئر وبعد أن يتم سمنتة القيسون يستأنف الحفر إلى مسافات أعمق تدلى بها سلسلة القيسون المرشد داخل البئر حيث يجري سمنتة السلسلة بعد ذلك.

أما بالنسبة لمانع التفجر فيتم ربطه بجهاز الحفر بواسطة ماسورة معدنية مجوفة marine riser وتمر سلسلة أنابيب الحفر خلال هذه الماسورة داخل البئر، ومن شأن وجود الماسورة إتمام دورة طين الحفر إلى داخل وخارج البئر، وفي الحالات الطارئة بسبب قسوة ورعونة الطقس يمكن غلق مانعات التفجر وفصل الماسورة الواصلة عنها وتحريك المنصة العائمة إلى موقع آمن، وبعد أن يسود الهدوء يمكن العودة بالمنصة إلى الموقع الأصلي للبئر والتعامل معها من جديد.

الحفر الإنمائي والمنصات الإنتاجية:

حفر الآبار الإنمائية هو ضرورة بعد مرحلة الاستكشاف والعثور على البترول في الخزانات الجوفية سواء كان ذلك في المناطق البرية أو البحرية، وفي جميع الأحوال يتم حفر عدد من الآبار لتنمية الحقول المكتشفة بناء على خطة مدروسة غير أن حفر الآبار الإنمائية في البحر وإنتاج الزيت أو الغاز الطبيعي سيكون مختلفاً عن مثيله على اليابسة حيث يأخذ الوضع في التنمية البحرية مساراً مختلفاً معتمداً في الأساس على إقامة المنصات الإنتاجية لتتلاءم والبيئة البحرية.

وهناك أنواع مختلفة من منصات الإنتاج البحري يتم استخدامها حسب الظروف السائدة بالمنطقة المكتشفة، ومن هذه المنصات ما يلي:

منصات الإنتاج البحري:

- **المنصة الثابتة:**

تعتمد المنصة الثابتة fixed production platform في تثبيتها على الجاذبية الأرضية حيث تتمتع بنية المنصة بقاعدة خرسانية مسلحة ومتينة وتعلو القاعدة أرجل فولاذية ترتكز فوقها مكونات المنصة والمرافق الخاصة بها، وللقاعدة المصمتة خلايا مجوفة التي تستخدم في تعويم المنصة عند تجميعها وجرها للموقع المنشود، وعلى هذا الموقع يمكن لتلك الخلايا المساعدة في عملية التوازن وكذا في تخزين الزيت الخام وزيت الديزل، ويستخدم هذا النوع من المنصات في المناطق ذات البحار العالية والعنيفة، ومن أمثلة هذا النوع من المنصات منصة الجاذبية gravity-base platform ذات القاعدة الخرسانية المسلحة والتي ترتفع عليها أرجل المنصة في وضع مستقر (شكل ٢١-٧أ).

• **منصة الدثار:**

منصة الدثار steel jacket platform هي منصة ذات أرجل فولاذية مشكلة على هيئة دثار أو غلاف مقام على قاع البحر (شكل ٢١-٧ب) وتتم عملية التشييد على الأرض ثم تعويم المكونات أو نقلها بالمراكب إلى موقع المنصة، وسحب الركائز إلى القاع لربط ولحام الأجزاء المختلفة مع أرجل المنصة ووضع التركيبات السطحية في مساحاتها المخصصة مثل تسهيلات الإنتاج والتي تضم صهاريج التخزين والفواصل والضواغط وكذا خزانات الطين ومولدات الطاقة ومساكن العاملين.

وفي العادة يتم ترك جهاز أو جهازين للحفر على منصات المياه العميقة حتى بعد الانتهاء من حفر الآبار لاستخدامها في عمليات إصلاح وصيانة الآبار.

أما بالنسبة لمنصات المياه الضحلة نسبياً فيمكن إقامة منصة منفصلة لمساكن العاملين المناوبين quarters platform بالقرب من منصة الإنتاج ويربط بين المنصتين جسر خاص لتسهيل الحركة وتأمين العمل هناك.

• **منصة الشد:**

وهي منصة من النوع العائم tension-leg platform (TLP) ويتم تثبيتها في الموقع المحدد بواسطة أحمال ثقيلة على قاع البحر، وترتبط هذه الأحمال بالمنصة بواسطة أنابيب فولاذية مجوفة يتروح قطرها بين ٠،٣-٠،٦ متر (١-٢ قدم) تسمى الأوتار tendons، وتعمل هذه الأوتار على جذب المنصة إلى أسفل في ماء البحر ومنعها من الصعود إلى أعلى حتى تكون بعيدة عن تأثير الموج وحركة المد والجزر (شكل ٢١-٧جـ).

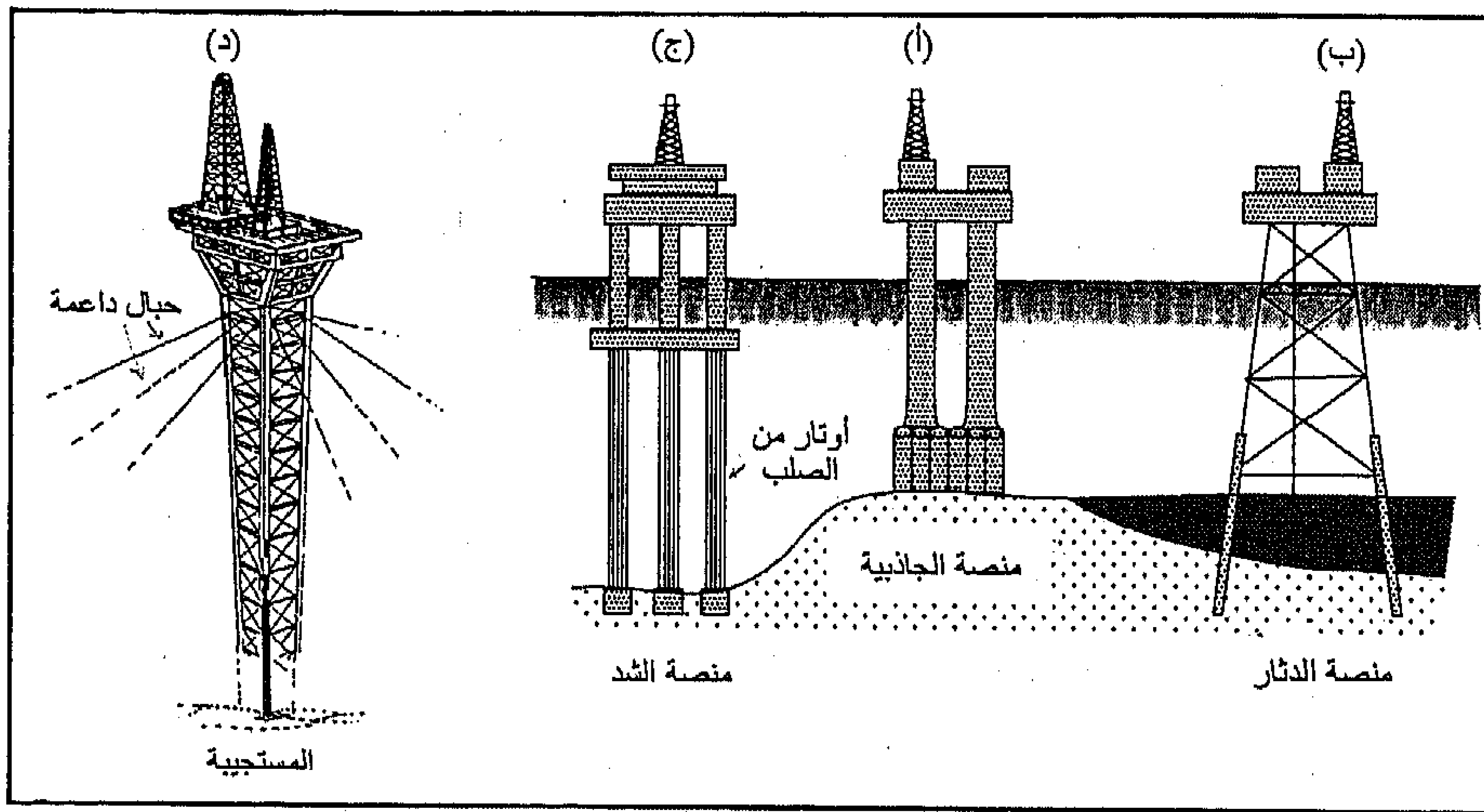
وهذا النوع من المنصات الإنتاجية يمكن استخدامه في المياه العميقة التي قد تصل إلى أكثر من ١٠٠٠ متر، وفي نسخة خاصة من هذه المنصات أن تكون لها فوهة للبئر دون تسهيلات لمعالجة الخام على سطحها، حيث يتم تدفيع الخام المنتج بواسطة خط أنابيب يمتد على قاع البحر حتى منصة الإنتاج المقامة في المياه الضحلة لمعالجة الخام.

• **المنصة المستجيبة:**

وهي نوع من المنصات الإنتاجية الخفيفة نسبياً، وقد تم تصميمها بحيث تتمايل وتتجاوب مع حركة الرياح والأمواج والتيارات المائية، ومن ثم كانت تسميتها بالمنصة المستجيبة compliant platform.

ومن هذه المنصات ما يعرف بمنصة البرج المدعم بالحبال guyed-tower (شكل ٢١-٧د) والذي يرتبط بمحور ارتكاز على قاع المحيط، ونوع آخر يعرف بمنصة الصاري spar وهي على هيئة أسطوانة عمودية ومقفلة وطافية بحيث تطفو في الماء دون أن ترتفع إلى نطاق فعل الأمواج، وفي هذين النوعين من المنصات يتم تثبيتها في موقعيهما بواسطة أسلاك إشعاعية وأحمال ثقيلة.

وتتم أعمال التركيبات تحت الماء والخاصة بالمنصات بواسطة غواصين divers مهرة تدربوا على القيام بهذه المهام ومنهم من يستطيع العمل على أعماق قد تصل إلى ٧٠٠ متر أو أكثر، كذلك فهناك مركبات تعمل بكفاءة عالية ودون تدخل بشري حتى عمق ٤٦٠٠ متر وتسمى مركبات التشغيل عن بعد remotely operated vehicles (ROV) وهي متصلة بالسفينة الأم بواسطة كبل، وعلى المركبة توجد كاميرا تليفزيونية ذات دائرة مغلقة تتيح للفنيين على السطح تشغيلها بواسطة قوة الدفع من خلال أذرع تشغيلية خاصة.



شكل ٢١-٧: رسوم تخطيطية لأنواع المنصات الإنتاجية البحرية ومرافقها.

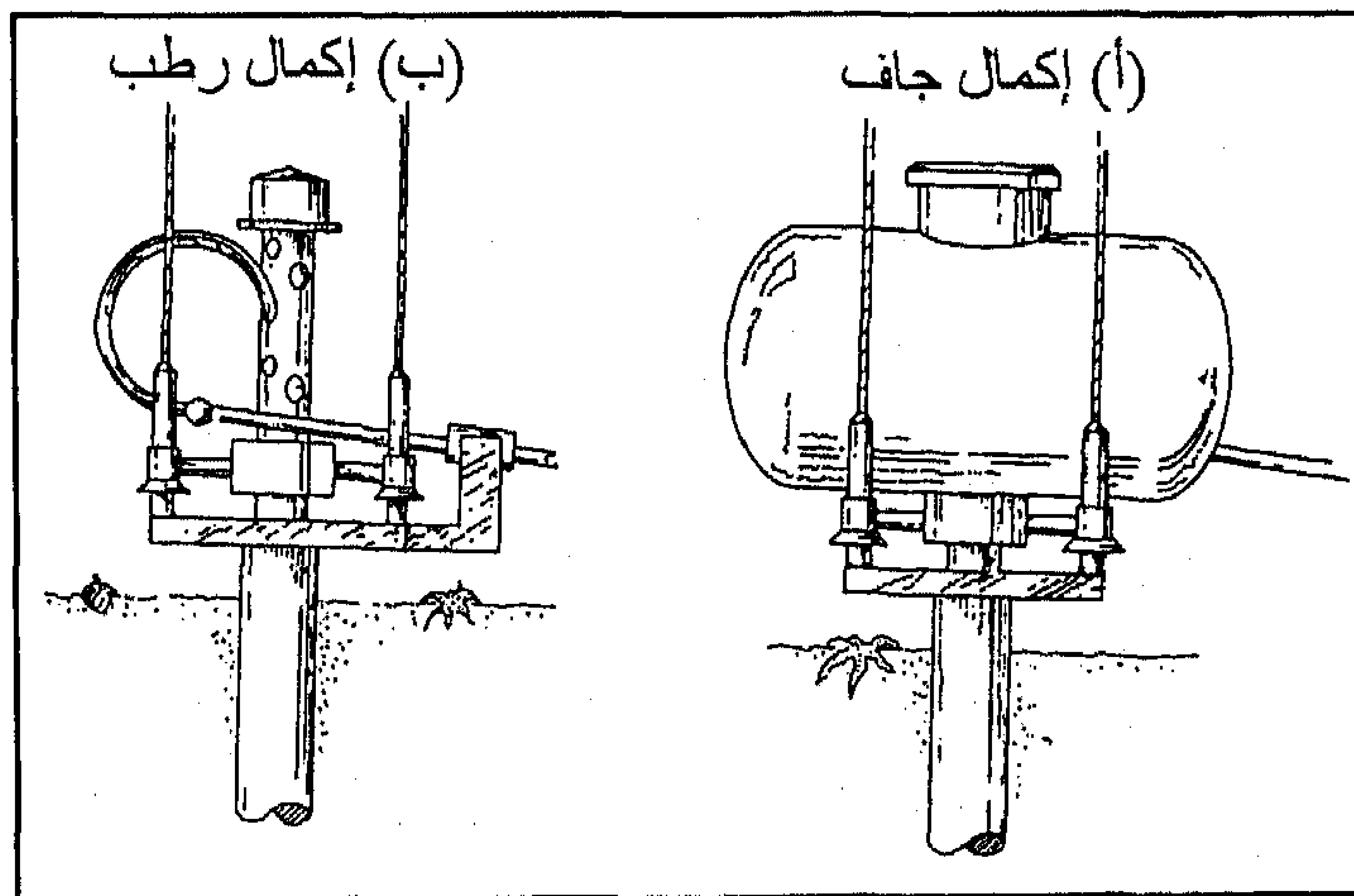
وعند التعامل مع قاع البحر sea bed ينبغي دراسته بشكل جيد ذلك أن هذا القاع قد يكون غير مستقر ويتسبب في انزلاقات أرضية تعرف بالانسيابات الطينية تحت الماء submarine mudflow، وقد حدث أثناء إعصار كبير أتى إلى دلتا نهر المسيسبي عام ١٩٦٩ أن انهار العديد من المنصات البحرية لحقول البترول هناك، وقد اعتقد الباحثون في بادئ الأمر أن أمواج الإعصار العاتية وكذلك الرياح الشديدة هي السبب في انهيار أجهزة

الحفر هناك، ولكن الدراسات العلمية اللاحقة أكدت أن سقوط الحفارات كان بسبب انسيابات أرضية تحت الماء عند قاع دلتا نهر المسيسبي طالت أرجل المنصات القائمة، وأدت إلى سقوط ٢٣ حفارة ونحو ١١٠ خط أنابيب هناك.

الإكمالات التحتبحرية:

تستخدم الإكمالات تحت البحر subsea completions بوجه عام في إنجاز الآبار البحرية واستثمارها نفس الطرق التي تتبع في الآبار البرية، وينطبق هذا بوجه خاص على الآبار التي تبرز رؤوسها فوق سطح الماء وهو أمر ممكن في حالة القيام بالأعمال من على سطح منصة ثابتة إلا أن الأمر يختلف في حالة الإكمال من على منصات عائمة إذ تظل رؤوس الآبار مغمورة في قاع البحر، فاستحالة إدخال معدات ضبط الآبار إلى أعمق ما يمكن للغطاسين بلوغه تستلزم استعمال أدوات للضبط تعمل آليا أو يمكن إدارتها من السطح.

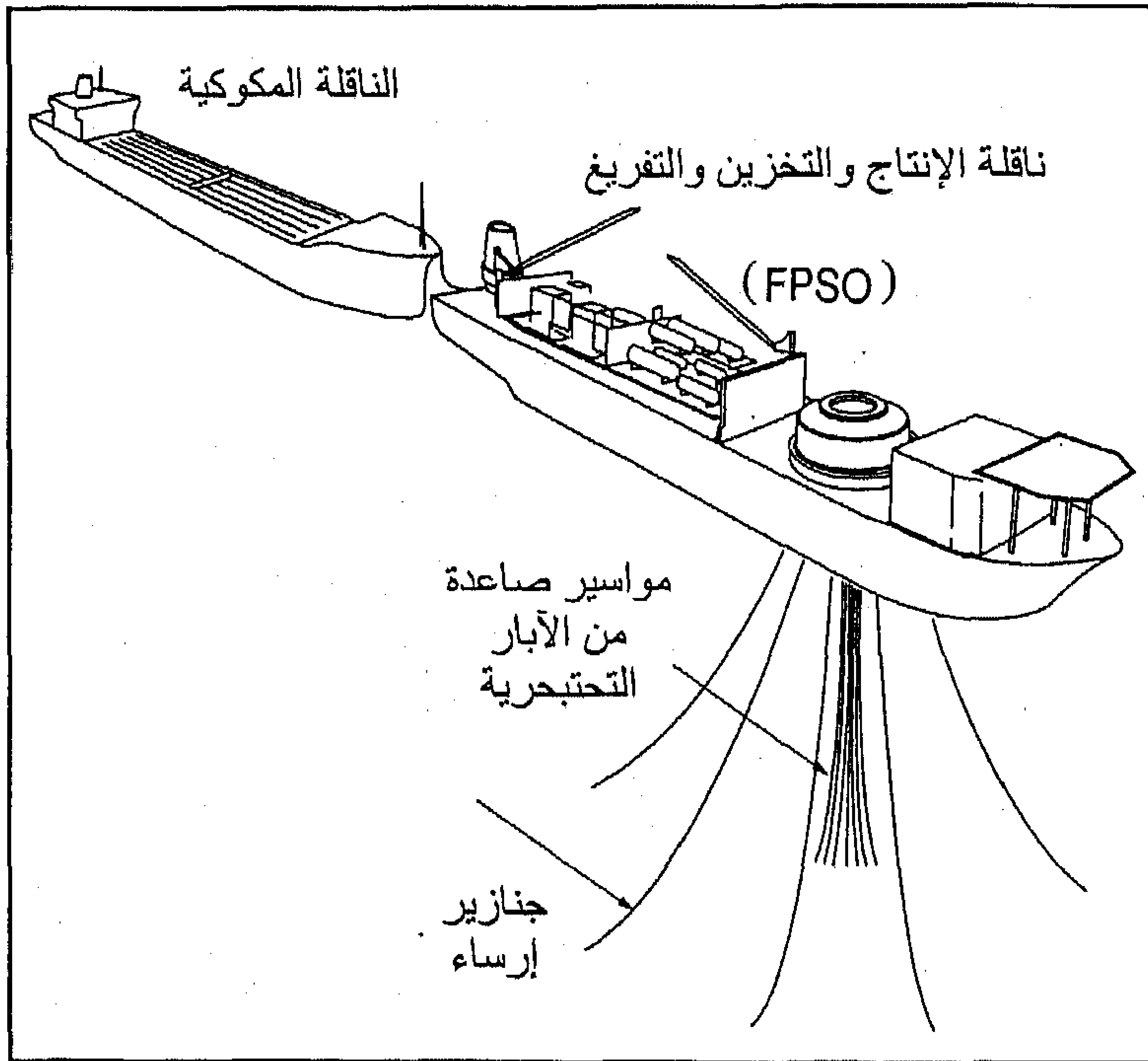
والإكمالات تحت البحر هي نوع من الإنجازات الخاصة بالآبار التي تتم على قاع البحر وحيث تثبت التجهيزات اللازمة للإنتاج مثل شجرة عيد الميلاد والرفع بالغاز وغيرهما على القاع مباشرة، ويتم حفر البئر التحتبحرية subsea well بواسطة السفن العائمة بدلاً من المنصة الإنتاجية وذلك عن طريق الإكمال الجاف dry (شكل ٢١-٨) من خلال حجرة تعزل التجهيزات عن الضغط الجوي أو بالإكمال الرطب wet إذا كانت التجهيزات معرضة لماء البحر (شكل ٢١-٨) وفي العادة يقوم الغطاسون بالإكمال الجاف للآبار.



شكل ٢١-٨: الإكمال في الآبار التحتبحرية.

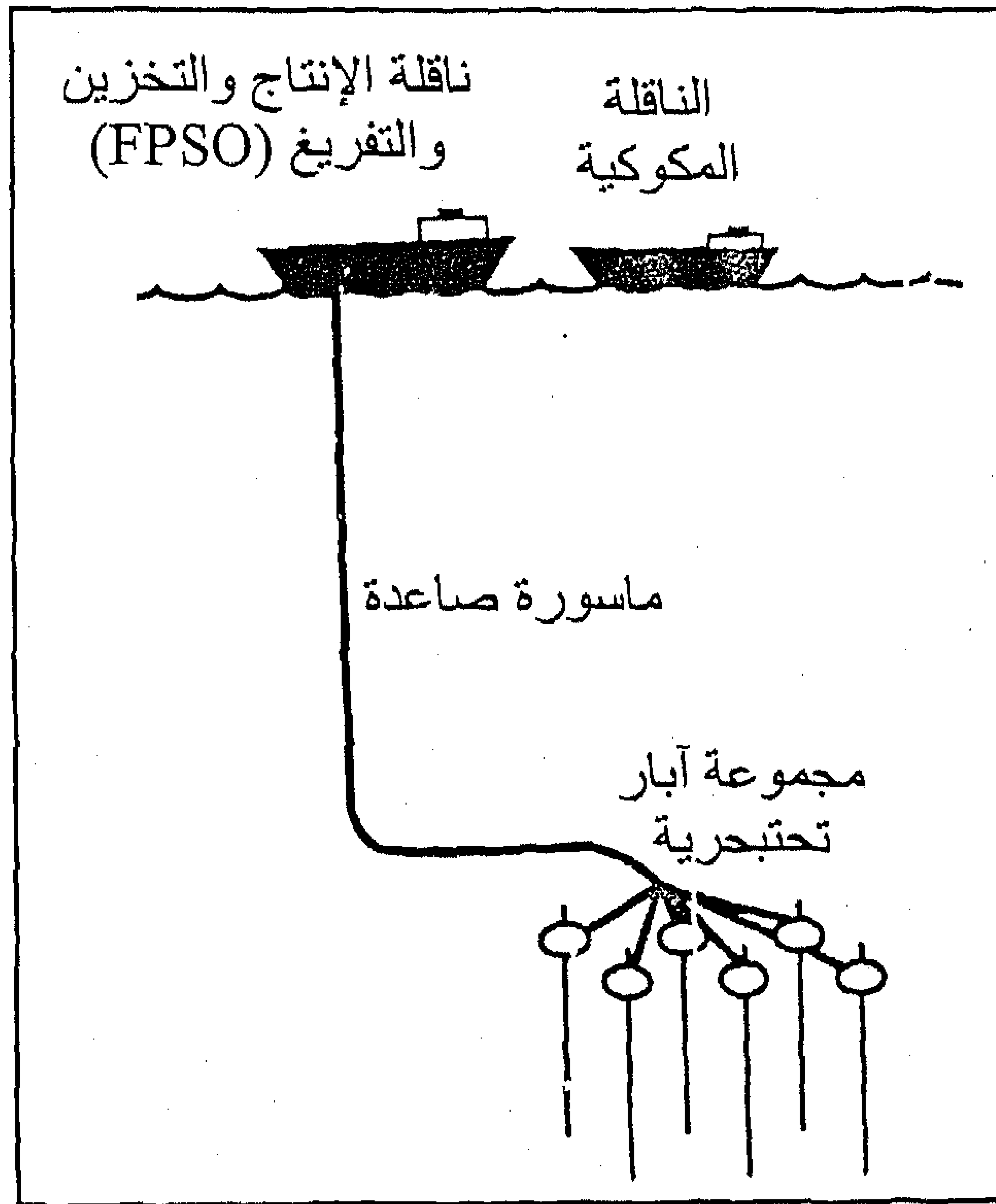
وينقل الإنتاج من البئر التحتبحرية بواسطة خط تدفق إلى مشعب خاص subsea manifold حيث يتم ربطه بعد ذلك إلى الإنتاج القادم من الآبار الأخرى، من بعد ذلك يتواصل نقل الخام إلى منصة الإنتاج للمعالجة.

وإضافة إلى منصات الإنتاج التي سبق مناقشتها هناك أيضاً الناقلة المعروفة بناقلة الإنتاج والتخزين والتفريغ floating production, storage and offloading vessel (FPSO) وهي ناقلة طافية (شكل ٢١-٩) وقد تكون قد تم تحويلها من وضع سابق للغرض الجديد أو أن تكون قد صممت من بدايتها لتخدم الغرض ذاته وهي تحتوى على تسهيلات فصل ومعالجة للخام المنتج، وتحتفظ الناقلة بموقعها في البحر بواسطة نظام إرساء خاص أو عن طريق التثبيت الديناميكي، وبعد أن يتم معالجة الخام داخل السفينة يجري نقله إلى حاوية أخرى تعرف بالناقلة المكوكيةshuttle tanker والتي تقوم بتوصيل الخام إلى الشاطئ لكي تعود من جديد لمواصلة مهمتها، وعادة ما يتم هذا النوع من الإكمال التحتبحري للآبار المحفورة في المياه الفائقة العمق.



شكل ٢١-٩: رسم تخطيطي لناقلة الإنتاج والتخزين والتفريغ.

وفي الحقول البحرية التي تتواجد بعض أجزائها في مواقع نائية وكذلك بالنسبة للحقول الصغيرة والتي لا تشكل بمفردها قيمة اقتصادية فإنه يمكن تنميتها بواسطة ما يعرف بالآبار التابعة أو المساعدة satellite wells وهذه الآبار يمكن حفرها باستخدام وحدات حفر متنقلة ويكون إكمالها كآبار تحت البحر، وبعد الانتهاء من هذا الإنجاز يتم ربطها بمنصات الإنتاج بواسطة خطوط التدفق، ويوضح الشكل ٢١-١٠ رسماً تخطيطياً لمجموعة من الآبار التحتبحرية وكيفية ربطها عن طريق المواسير الصاعدة risers بناقلة الإنتاج والتخزين والتفريغ، وقيام الناقلة المكوكية بتوصيل الخام إلى الشاطئ.



شكل ٢١-١٠: كيفية ربط الآبار التحتبحرية.

الفصل الثاني والعشرون

صيانة وإصلاح الآبار

لا يستمر إنتاج الآبار دون صيانة أو إصلاح سواء كان ذلك بصورة دورية أو بسبب حالة طارئة، ولكي تتم أعمال الإصلاح بنجاح يجري إغلاق shut in البئر المراد إصلاحها حيث يتوقف الإنتاج مؤقتاً لحين إنجاز المهمة المطلوبة والتي تهدف أساساً إلى الحفاظ على حالة البئر التشغيلية واستعادة أو تحسين معدلات الإنتاج بها، ويسمى هذا النشاط علمياً الإصلاح workover، وبالطبع فإن عملية الإصلاح ليست مسألة سهلة فهي تحتاج إلى خبرة وحرفية عاليتين حتى يتحقق الغرض ودون أن يتعطل الإنتاج طويلاً مما يسبب خسارة مالية قد تكون بالغة.

تحضير البئر للإصلاح:

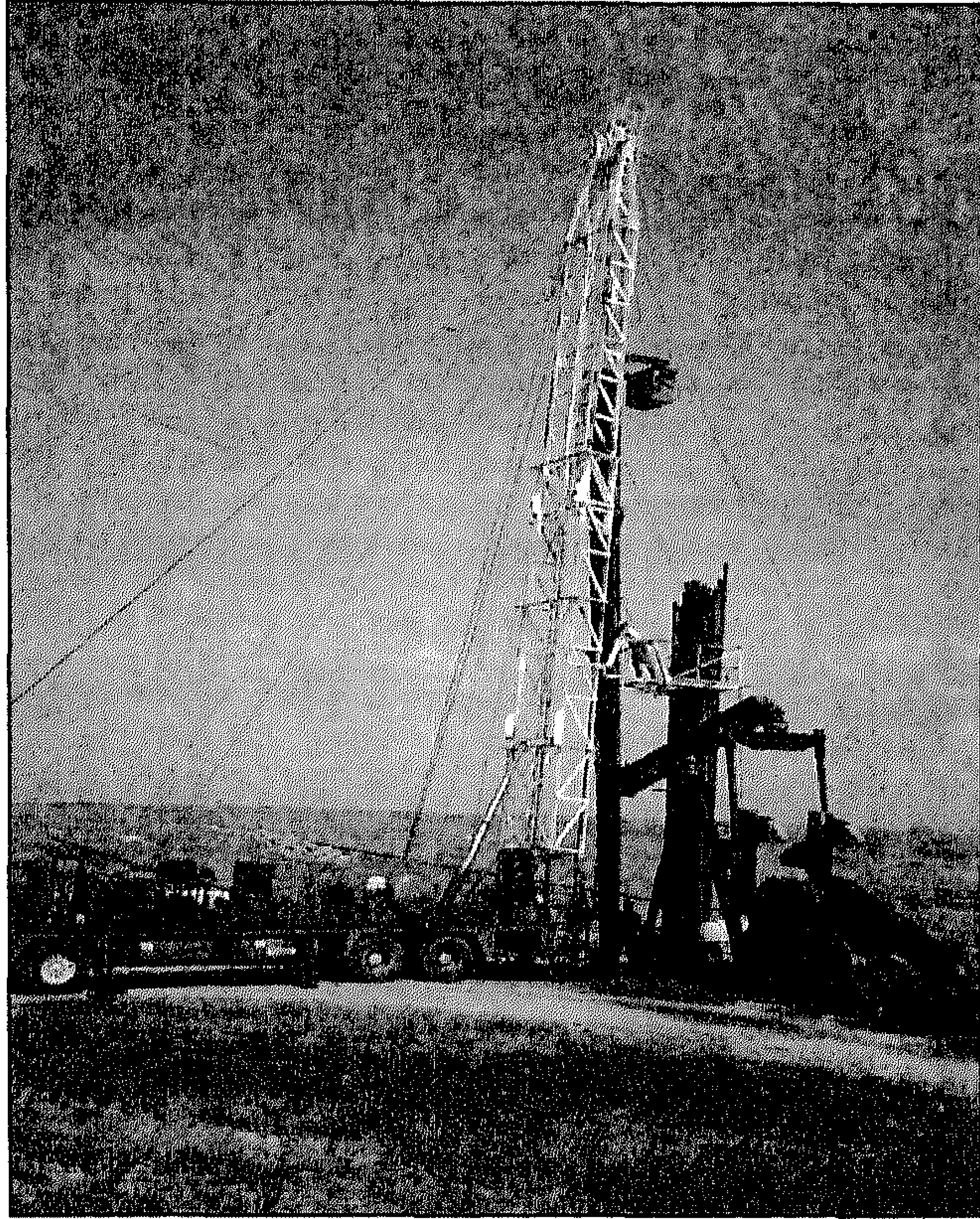
قبل أن تتهيأ البئر لعملية الإصلاح يجري قتلها ووقف إنتاجها، وتستخدم في هذا الشأن موائع مختلفة تسمى موائع القتل kill fluids مثل الماء المالح أو سائل الحفر أو الزيت وغيرها من السوائل، وعادة ما يضخ سائل القتل في الحيز الموجود بين القيسون وأنبوب الإنتاج ليكمل دورته إلى أعلى خلال أنبوب الإنتاج، وبعد الانتهاء من قتل البئر يجري تثبيت مانعات التفجر BOP وسحب أنبوب الإنتاج وأية تجهيزات قاعية أخرى، وفي الآبار ذات الضغط المنخفض لا توجد حاجة ماسة إلى استخدام مانعات التفجر.

وفي الآونة الأخيرة أدخلت أساليب يمكن بواسطتها إصلاح الآبار وإحلال المعدات بل وأيضاً إجراء عمليات أخرى مثل تنشيط الآبار وتسجيلات الإنتاج وخفض كميات الماء المنتجة وذلك دون الحاجة إلى غلق الآبار وتعطيلها عن الإنتاج وهي ما تسمى بالتدخلات أو التوسطات البئريةwell intervention.

التجهيزات الحقلية:

كانت أعمال الإصلاح في الماضي تتم بواسطة برج الحفر الذي كان غالباً ما يترك على البئر بعد إكمالها وبدء الإنتاج بها، وبالطبع فإن ذلك كان راجعاً إلى أن الآبار كانت في أغلبها ضحلة، كما أن أجهزة الحفر لم تكن قد تطورت بالشكل الذي هو عليه الآن.

أما الآن فتتم عملية الإصلاح بواسطة شركات متخصصة تستدعي لهذا الغرض حيث يستخدم جهاز يشبه جهاز الحفر المعتاد (شكل ٢٢-١) ويعرف بجهاز الإصلاح workover rig ويمكن لهذا الجهاز الحفر باستخدام أنبوب حفر أو أنبوب إنتاج من خلال دورة لطين الحفر أو الفوم foam المكون أساساً من الهواء أو النيتروجين.



شكل ٢٢-١: وحدة خدمات لإصلاح الآبار.

وإضافة إلى جهاز الإصلاح الضخم هناك وحدات صغيرة تحمل على شاحنات أو مقطورات تحتوى على أجهزة رافعة وونش وصار ومجموعة البكرات والأسلاك المستخدمة لهذه الغاية.

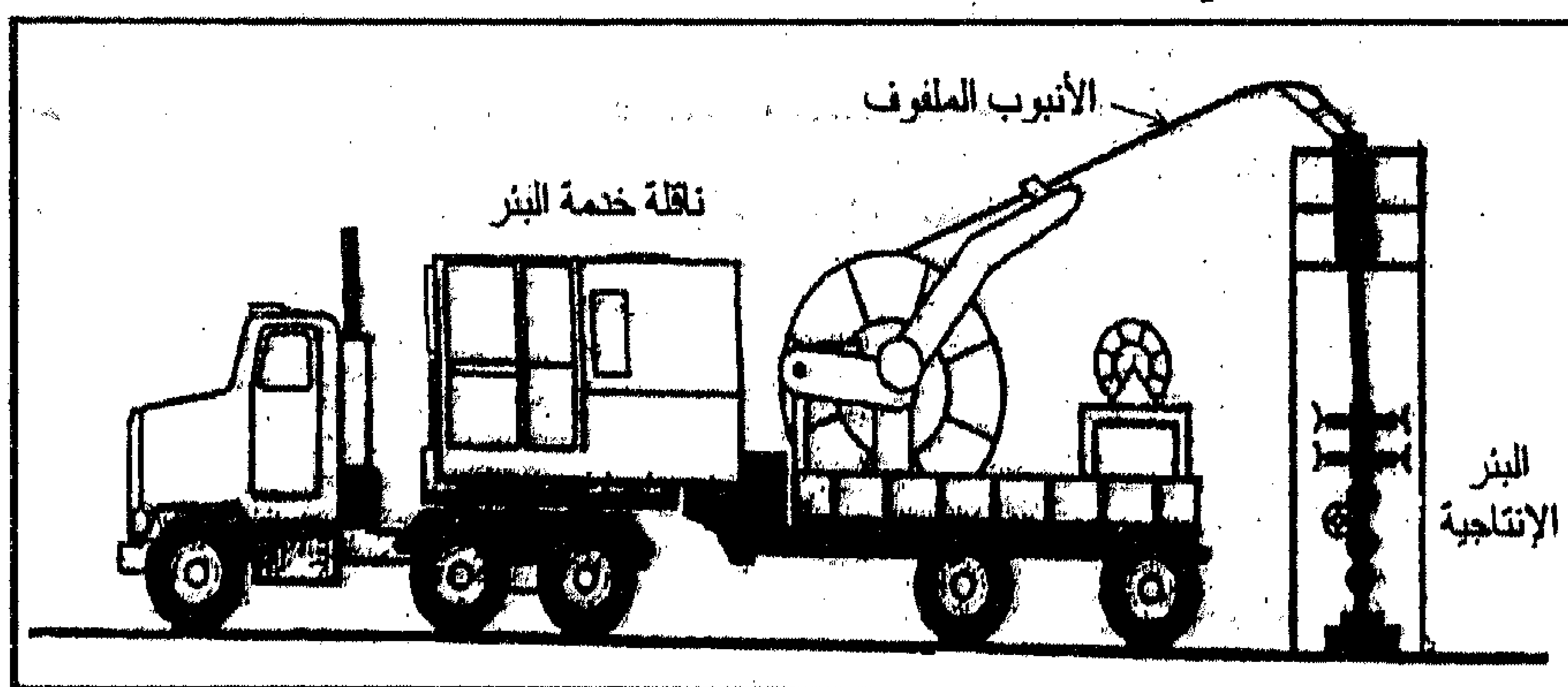
ويتكون كبل الرفع من السلك الصلب إما من النوع المجدول (المضفر) wireline أو الأملس slickline، كما توجد روافع على البكرة المتحركة تستخدم في قمط وصلات أنابيب الإنتاج وقضبان السحب في الصكرود، كما توجد أيضا منزلقات وملاقط هيدروليكية لربط وفك الوصلات بالإضافة إلى الوصلة الدوارة وجذع الحفر المضلع الذي يدير سلسلة

الأنابيب. وبالنسبة للصاري mast هناك نوعان أحدهما يسمي الصاري القطبي pole mast ويتكون من أعمدة من الصلب يمكن تركيبها أو فكها عند إقامة الوحدة وفكها بعد أداء مهمتها، أما الصاري التركيبي structural فيتكون من أعمدة زاويَّة من الصلب وله منصة تحميل واحدة أو سلة لقضبان السحب ومنصة لأنابيب الإنتاج، ويتم تثبيت الصاري بواسطة أسلاك منتشرة بشكل شعاعي وموصلة بمراسي في الأرض.

ويتكون طاقم العمل من ثلاثة أو أربعة أفراد منهم المشغل ومسئول البرج وعامل أو عاملين آخرين، وعلى غير العمل بأجهزة الحفر العادية فإن العمل على أجهزة الإصلاح يكون فقط أثناء النهار إلا في حالات استثنائية.

كذلك هناك وحدات عبارة عن ناقلات carrier units للعمل على الطرق السريعة ومزودة بمحركات ديزل وأجهزة الرفع والصاري، وعادة ما يكون الصاري محمولاً على مؤخرة الناقلة لإتاحة القيادة الآمنة.

ومن الوحدات الخدمية الشائعة الآن وحدة الأنبوب الملفوف coiled tubing unit والتي تتكون من شاحنة تحمل في مؤخرتها أنبوباً ملفوفاً (شكل ٢٢-٢) وهو الذي يعمل على إنزال ورفع التجهيزات إلى ومن البئر، ويتكون من أنبوب مرن من الصلب قد يصل طوله إلى ٥٨٠٠ متر (١٩٠٠٠ قدم) وقطره إلى ثلاث سنتيمترات ($1\frac{1}{4}$ بوصة)، ومن مزايا الأنبوب الملفوف أنه لا يحتاج إلى وقت طويل في استخدامه مقارنة بالأنابيب ذات الوصلات والتي تتطلب وقتاً أطول في ربطها وفكها، ولما كان الأنبوب الملفوف يتم الدفع به إلى داخل البئر خلال رأس تتحكم في ضغط الإدخال فإنه يمكن استخدام ذلك في الآبار ذات الضغط العالي.



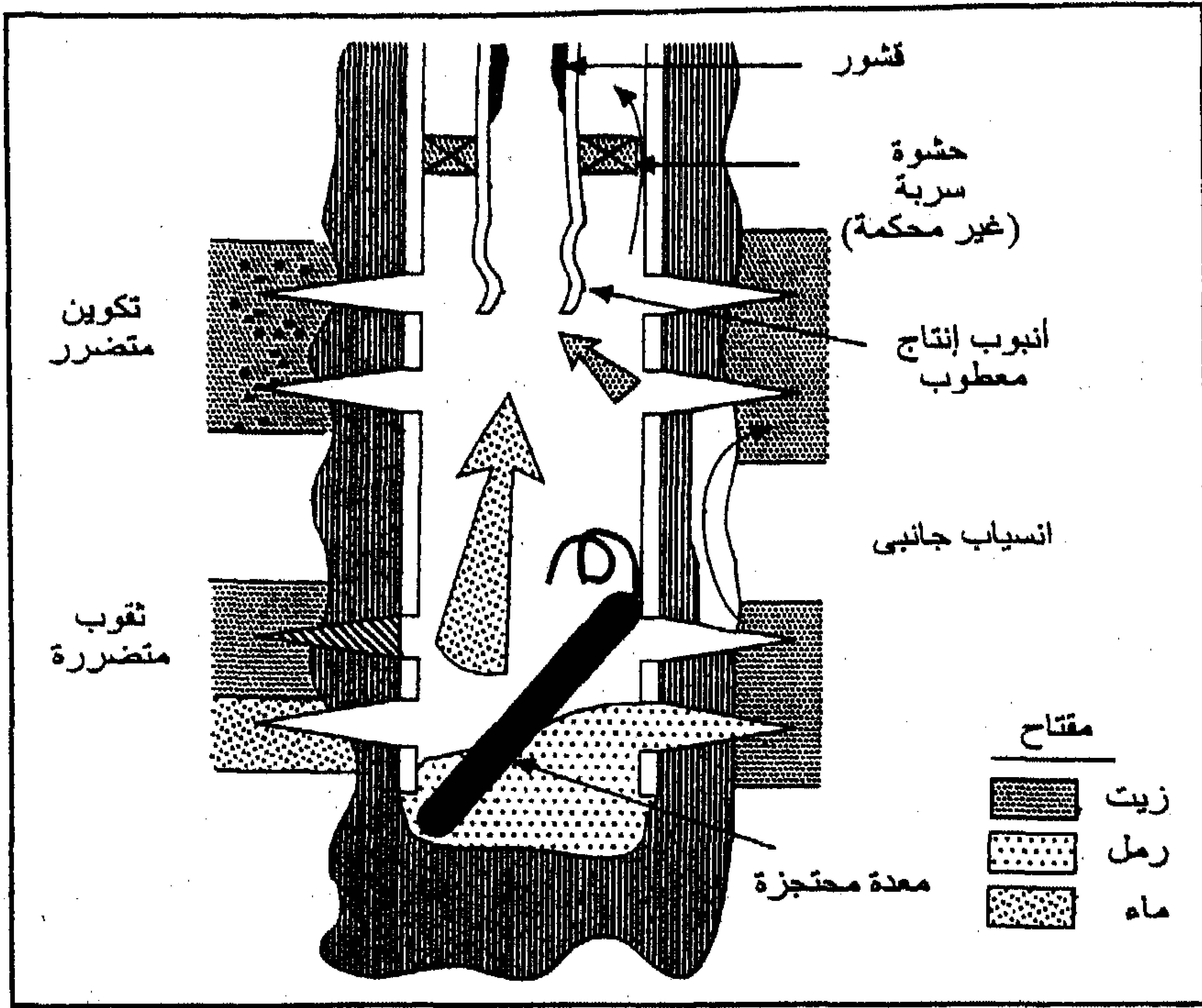
شكل ٢٢-٢: وحدة الأنبوب الملفوف.

مشكلات الآبار:

هناك عدد من المشكلات والمصاعب التي يكثر حدوثها داخل الآبار المنتجة مثل دخول الرمل إلى قاع البئر وترسب الشمع في الأنابيب وانكسار قضبان السحب واهتزاز الغواطس والصمامات في المضخات الجوفية وتلف أنبوب الإنتاج والقيسون مما قد يتسبب في إلحاق الأذى للخزان formation damage وتدني الطاقة الإنتاجية للبئر، والشكل ٣-٢٢ يمثل رسماً افتراضياً للأضرار المختلفة التي قد تصيب البئر المنتجة ويتطلب الأمر التدخل لإزالتها حتى تعود البئر إلى حالتها الطبيعية، وفيما يلي شرح لكل مشكلة على حدة وكيفية معالجتها.

- **تجمع الرمل إلى داخل البئر:**

يحدث في أحيان غير قليلة أن يدخل الرمل كمكون للخزانات الجوفية إلى قاع البئر بالرغم من استخدام مختلف أنابيب التغليف القاعية أو أساليب تثبيت الرمل، وبالإضافة إلى تسبب الرمل في تآكل أجزاء المضخة في آبار الضخ وربما أيضاً في تآكل تركيبة رأس البئر والمعدات على السطح بإمكان ذلك الرمل أن يملأ البئر إلى ارتفاع كبير، وهي مشكلة تعرف بمشكلة التحكم في الرملsand control problem، ويمكن إزالة cleanout هذا الرمل ودون الحاجة إلى سحب أنبوب الإنتاج باستخدام الأنبوب الملفوف أو جهاز الحفر المكاروني والذي يمكن إنزاله داخل أنبوب الإنتاج حيث يضخ الماء المالح في هذا الأنبوب مما يعمل على دفع الرمل ورفعه إلى أعلى البئر في الحيز الموجود بين أنبوب الإنتاج والقيسون، أما إذا تمت إزالة أنبوب الإنتاج فإنه يمكن استخدام أنبوب ذي قطر أكبر ويضخ الماء المالح في الفراغ بين القيسون وأنبوب الإنتاج ثم يجري سير الماء والرمل إلى أعلى أنبوب الإنتاج، كما يمكن الاستعانة أيضاً بمنزحة bailer (أو مضخة للرمل) معلقة بكبل معدني أسفل أنبوب الإنتاج لإزالة الرمل وتنظيف البئر منه.



شكل ٢٢-٣: رسم افتراضي للأضرار المختلفة التي قد تتعرض لها البئر.

- **ترسب الشمع في الأنبوب:**

يترسب الشمع أحياناً من بعض أنواع الزيت الخام على جوانب مجموعة أنبوب الإنتاج في الجزء الأعلى البارد من البئر، ويمكن إزالة هذا الشمع بالطرق الميكانيكية باستخدام سكين الشمع paraffin knife أو كاشطة الشمع paraffin scraper وذلك بتدلية أي منهما بواسطة كبل معدني إلى داخل الأنبوب، ولكن الحاجة تدعو أحياناً أخرى إلى سحب أنبوب الإنتاج وتسخينه على البخار لتذويب الشمع، ومن أجل تجنب ذلك ترفع أحياناً درجة حرارة الزيت بتسخين الجزء العلوي من الأنبوب بالكهرباء أو بحقن البئر بزيت ساخن، ويمكن التقليل من تكون رواسب الشمع بتغليف الأنبوب بالبلاستيك الذي يجعل السطح أملس.

- **تآكل قضبان السحب وانكسارها:**

يحدث أحياناً أن تنكسر قضبان السحب للمضخات الجوفية بسبب تآكلها أو اهترائها، ولمعالجة هذا الأمر يسحب الجزء العلوي من سلسلة الصكرود بعد فكه آلياً

بملقط أو كلابة خاصة أو يدوياً بمفتاح ربط، ويتم بعد ذلك إلتقاط الجزء السفلي والمكسور من السلسلة، كذلك فإنه يجري سحب القضبان عند إجراء إصلاح وصيانة لأنبوب الإنتاج أو المضخة القاعية، وخلال سحب هذه الأجزاء ووصولها إلى السطح فإنها توضع على الأرض أو ترص رأسياً على جانب الصاري، وإذا كانت البئر تحت الضغط يربط بقمة البئر مانع تدفق خاص لضمان السلامة والأمان أثناء سحب القضبان.

- **إصلاح أنبوب الإنتاج:**

عندما يتدنى الإنتاج في البئر وربما يكون ذلك راجعاً إلى تسرب خلال أنبوب الإنتاج بسبب تآكله أو إجهاده أو سنفرته يسحب أنبوب الإنتاج ويتم فحصه وصيانته، وعند إنزاله من جديد داخل البئر يجري اختبار للضغط للتأكد من سلامته، كذلك فإنه يمكن فتح الأنبوب المنهار وتشكيله بالطَّرق لعدة مرات بواسطة آلة خاصة tubing swage متصلة بكبل معدني خلال سلسلة أنبوب الإنتاج.

- **عطل المضخة الجوفية:**

من المحتمل أن يكون تدني الإنتاج في البئر بسبب عيب في تصنيع المضخة الجوفية، وفي هذه الحالة تسحب مجموعة الصكرود وأنبوب الإنتاج لاستعادة مضخة الإنتاج حيث يتم فحص المضخة وأجزائها المختلفة وإصلاحها أو استبدالها عند الضرورة.

- **تلف وانهيار القيسون:**

يمكن فتح أنبوب التغليف (القيسون) المنهار بواسطة مجموعة من الدلافين rollers تعمل على الجوانب التالفة من الأنبوب، كما يمكن توسيع القيسون باستخدام طاحونة مستدقة الطرفtapered mill يتم إنزالها إلى داخل البئر، وإذا ما فشلت الجهود في إنجاز المهمة كان لا بد من حفر مسار جانبي sidetrack للبئر، أما التسربات من القيسون فيمكن الكشف عنها بواسطة اختبارات الضغط في البئر كما يمكن سد الثقوب وإصلاحها برقعة معدنية casing patch يتم تغريتها في الأماكن المطلوبة بالمعالجة الراتينجية.

ومن ناحية أخرى قد يقتضي الأمر إجراء سمنتة ثانوية secondary cementing داخل البئر بسبب أن ما أجري من سمنتة أولية لم يكن كافياً، فهناك لا تزال فجوات gaps وشقوق وراء القيسون تؤكدها تسجيلات الآبار وينبغي سدها، وفي هذا الشأن

يجري تثقيب هذه الفجوات وكبسها بالأسمنت تحت الضغط ومنع ما قد يحدث من تسربات من وإلى البئر.

- **تواجد الماء أو سائل الحفر في البئر:**

قد تتواجد المياه أو تتبقى سوائل الحفر داخل البئر مما قد يعرقل تدفق الزيت أو الغاز إلى الخارج لذا وجب التخلص من هذه السوائل وتفريغها من داخل البئر واستعادة الإنتاج إلى معدله الطبيعي.

ولمعالجة هذا الأمر يمكن أن يتم ذلك باستخدام الآلة الماسحة swab tool والتي تحمل على شاحنة عليها صار قصير يستعمل في إنزال الماسحة بواسطة كبل معدني إلى داخل أنبوب الإنتاج، وآلة التنظيف أو الممسحة عبارة عن قضيب مجوف من المعدن وله أقداح من المطاط، وعندما ترفع الآلة داخل البئر فإنها تعمل كمكبس يرفع السائل إلى خارج البئر متيحاً بذلك للزيت أو الغاز للتدفق.

وفي آبار الغاز يحدث أحياناً وبسبب وجود الماء في البئر أن يتعطل تدفق الغاز إلى الخارج، ولمعالجة ذلك تلقى داخل أنبوب الإنتاج قطع من الصابون حيث يعمل هذا الصابون على إحداث فقاقيع من الغاز تساعد على رفع الماء من البئر إلى الخارج، وتسمى هذه العملية بصبْونة البئر soaping well.

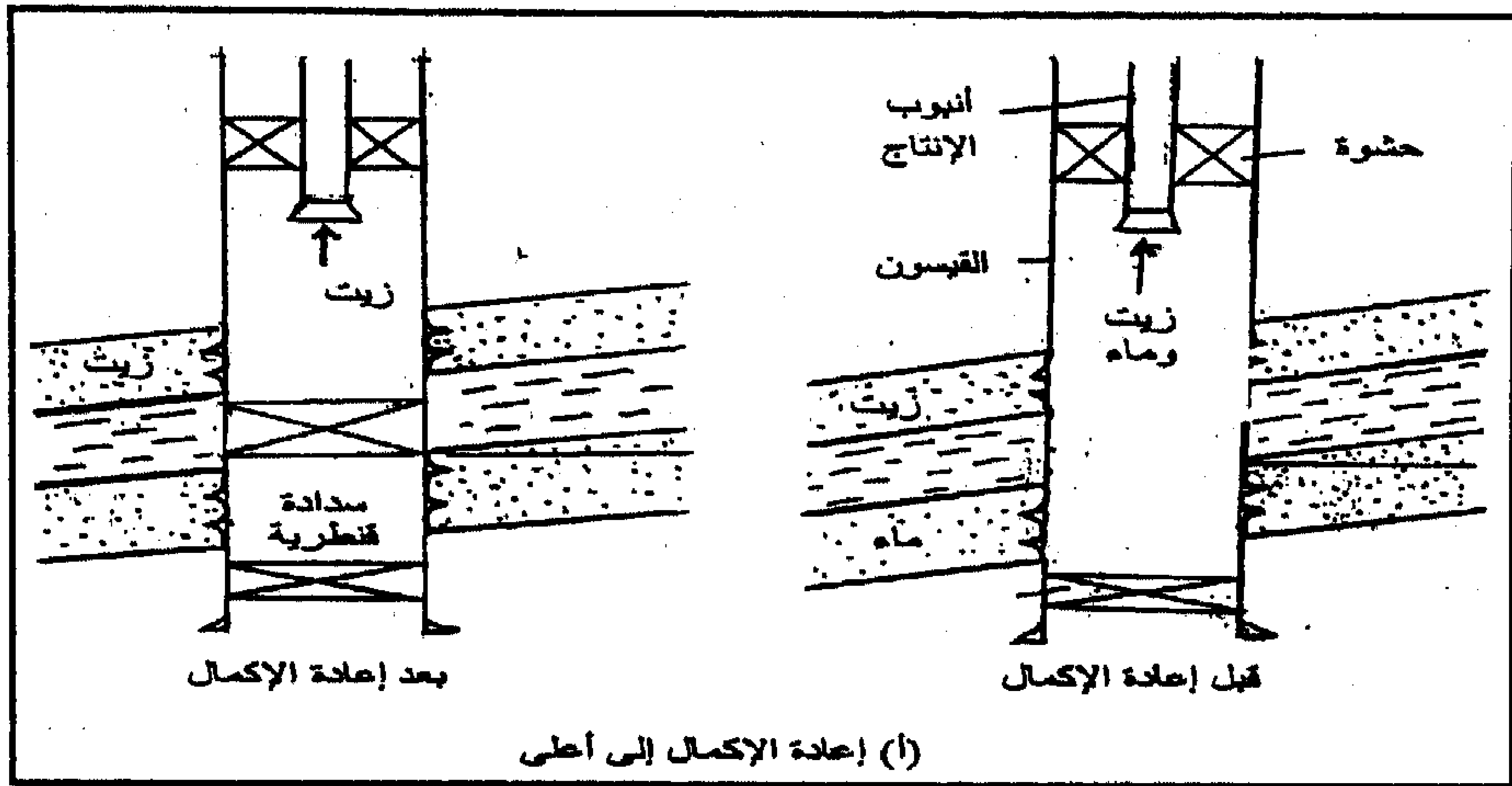
- **مشاكل الإحلال:**

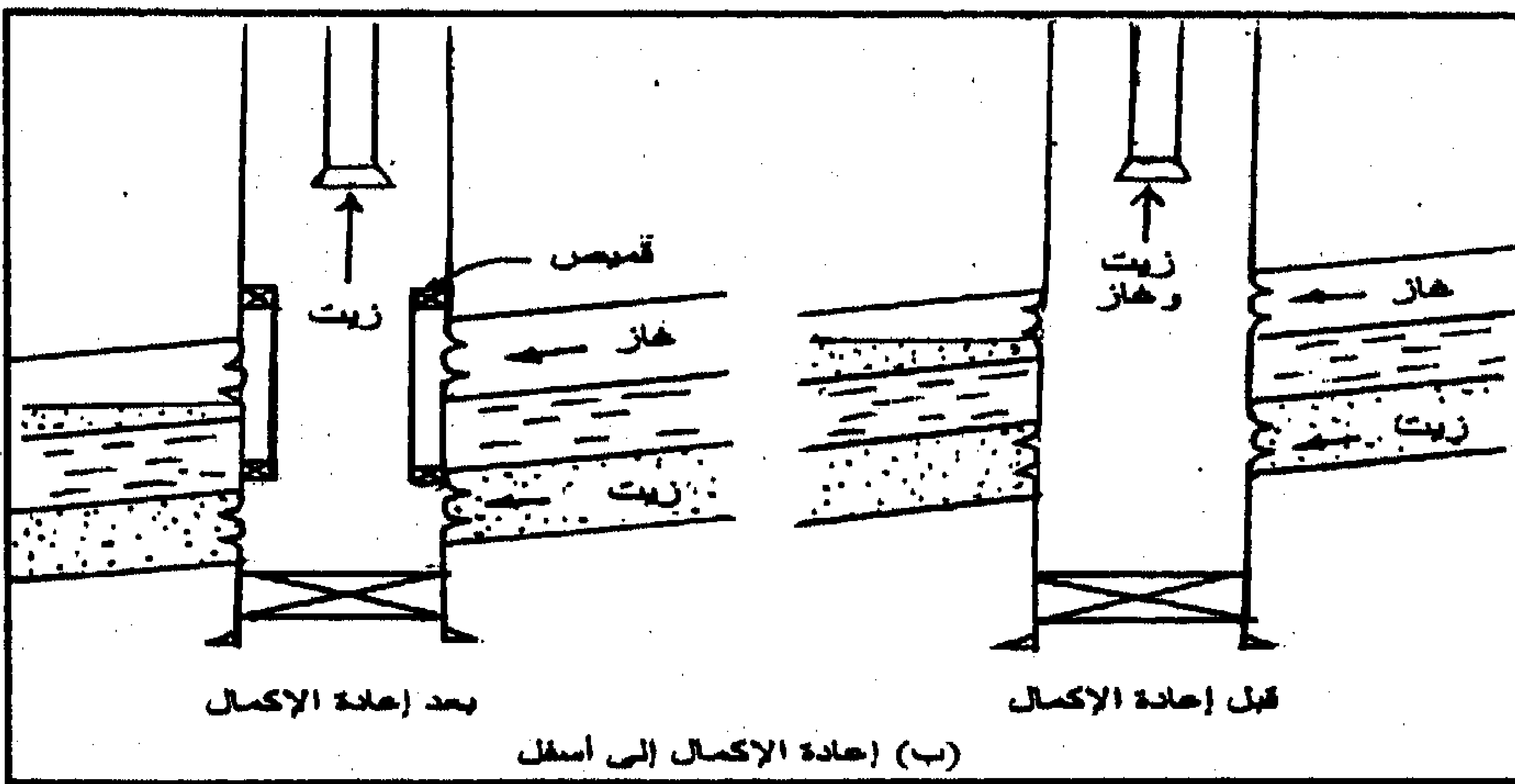
هناك من المكونات البئرية التي يتطلب بسبب عدم كفاءتها التشغيلية استبدالها وإعادتها أو التخلص منها كلية وإحلالها بمكونات جديدة لتؤدي أغراضها العملية، فقد يحدث مثلاً التصاق بعض الصمامات كالتي تستخدم في عمليات الرفع بالغاز أو تلف الحشوات المانعة للتسرب والمثبتة بين القيسون وأنبوب الإنتاج، وفي جميع الحالات يتم الإحلال بواسطة أعمال السلك wireline، غير أنه في حالة الحشوات من النوع غير القابل للاستعادة nonretrievable packers فإنه يمكن طحنها داخل البئر فعادة ما تكون مصنعة من معدن رخو يسهل طحنه وإزالته.

إعادة الإكمال:

قد يجري للبئر المنتجة إعادة إكمال لها recompletion، بأن يتقرر هجر الطبقة المنتجة والانتقال إلى طبقة جديدة ربما كانت في موقعها أعلى أو أسفل الطبقة الأصلية

(شكل٢٢-٤) ، فإذا كانت الطبقة المستهدفة على عمق أكبر من الطبقة الأصلية وجب الشروع في حفر إضافي حتى الوصول إلى الطبقة الجديدة واختراقها، وإذا كانت الطبقة المستهدفة على عمق أقل من الطبقة الأصلية فإنه يلزم سد البئر plug back بالأسمنت قبل الشروع في إكمالها، وتتم عملية السد بالأسمنت بإحدى طرق ثلاث: أن تجري عملية كبس squeeze لملاط الأسمنت لسد الثقوب في الطبقة الناضبة depleted zone، أو عن طريق ضخ الأسمنت حتى تمتلئ به البئر وإلى المستوى المطلوب ويكون ذلك باستعمال سدادة أسمنتية cement plug، والطريقة الثالثة هي تركيب سدادة قنطرية ridge plug لسد الحيز المطلوب ميكانيكياً ثم إنزال منزحة مفرغة dump bailer عبارة عن أسطوانة طويلة معبأة بالأسمنت إلى داخل البئر لوضع الأسمنت على سطح السدادة القنطرية.





شكل ٢٢-٤: إعادة إكمال الآبار.

متطلبات الإصلاح:

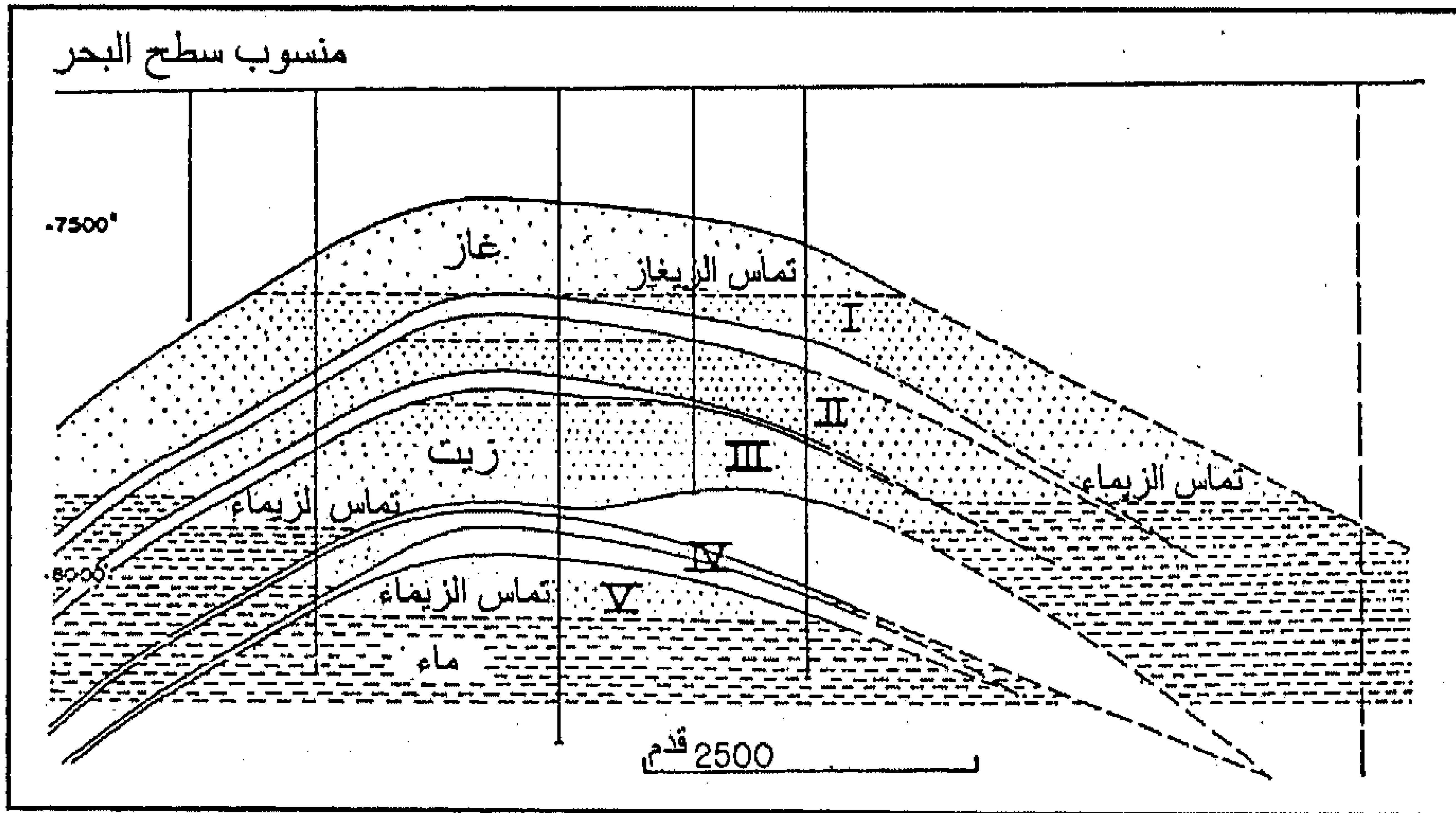
تتطلب الإصلاحات الجذرية وكذلك بعض الإصلاحات الأقل أهمية معدات سحب ثقيلة باهظة التكاليف لا سيما في المناطق المغمورة بالمياه، ومن الأفضل اقتصادياً في هذه الأحوال اللجوء إلى أسلوب خاص يسمى النوع الدائم في إكمال الآبار، فالإكمال الأولي أكثر تكلفة إذ يجب وضع معدات خاصة لاستعمالها إذا ما تطلب الأمر القيام بأنواع معينة من الإصلاح، إلا أن إجراء هذه الإصلاحات يصبح عندئذ ممكناً باستخدام معدات خفيفة الوزن ومنخفضة التكاليف دون الاضطرار إلى سحب مجموعة الأنابيب من البئر، أما الوفرة الإجمالية فقد تكون ضخمة للغاية.

الفصل الثالث والعشرون

آلية الدفع وسلوك الخزانات البترولية

أساس نظرية آلية الدفع:

تنشأ حركة الموائع من زيت وغاز وماء داخل مسام الخزان الجوفي من الضغط الواقع عليها وتسمى الطاقة التي تنتج الزيت والغاز طاقة الخزان reservoir energy أو دفع الخزان reservoir drive وهي تأتي أساساً من تمدد الموائع وتمدد الصخر الخزان وأيضاً من الجاذبية. وكما ذكرنا في فصل سابق لا يمكن النظر إلى تجمع الزيت بمعزل عما يصاحبه عادة من غاز وماء مالح، فقد يوجد الغاز في حالة طليقة في الجزء الأعلى من البنيان الذي يعلو الزيت، أما الزيت الموجود عادة تحت ضغط كبير فيحتوي في معظم الحالات على غاز كثير ذائب فيه وأما الماء فيوجد عادة تحت الزيت، ويفصل بين كل من الغاز والزيت والماء تماسات عرفناها بتماس الزيغاز وتماس الزيماء، وإذا ما وجد الغاز دون مصاحبته للزيت يكون التماس في هذه الحالة هو السطح الفاصل بين الغاز والماء أي تماس الغاماء. ويوضح الشكل ٢٣-١ قطاعاً جانبياً لحقل تن Ten بكاليفورنيا يحتوي على خمس طبقات من الحجر الرملي من عصر الميوسين حيث توجد خزانات الغاز والزيت والماء وتماسات الموائع المختلفة وأن هذه الخزانات غير متصلة فيما بينها.



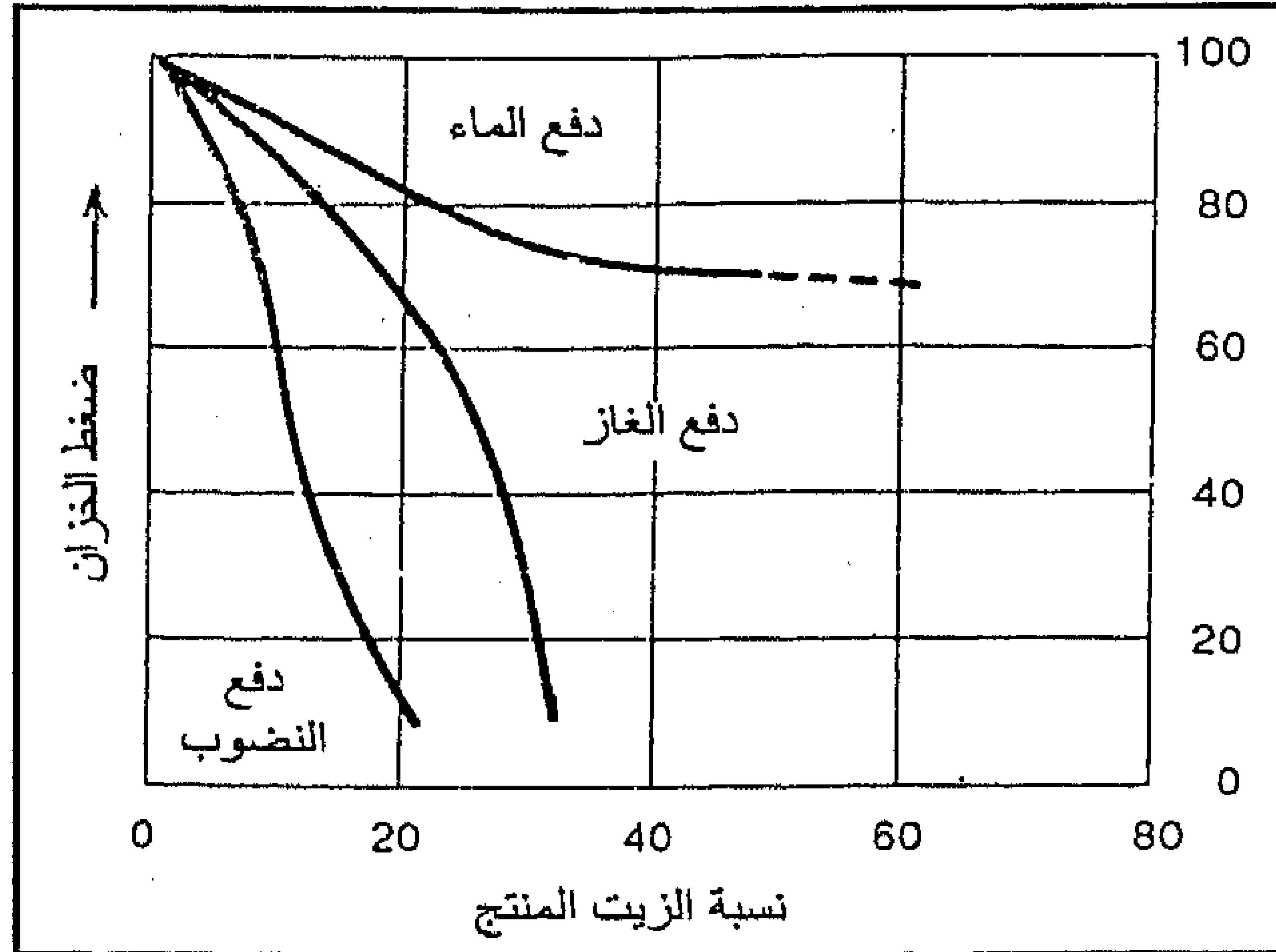
شكل ٢٣-١: قطاع في حقل تن بكاليفورنيا يوضح تماسات الموائع المختلفة في خزانات الحجر الرملي الحاملة للغاز والزيت والماء.

إن إنتاج الزيت من الخزان الجوفي يستلزم إبقاء الضغط منخفضاً في داخل البئر المنتجة مقارنة بضغط الخزان ذاته، وفي ظل هذا الفارق في الضغط ينتقل الزيت مع الغاز الذائب فيه ومعهما إلى حد معين الغاز الطليق free gas وربما أيضاً الماء نحو الآبار وإلى داخلها، وهكذا فإن معدل إنتاج البئر يتوقف كثيراً على الضغط في قاع البئر وعلى الضغط في الخزان وعلى سهولة انتقال السوائل عبر الخزان نحو البئر وهذه السهولة تتوقف على لزوجة هذه السوائل وعلى نفاذية الخزان.

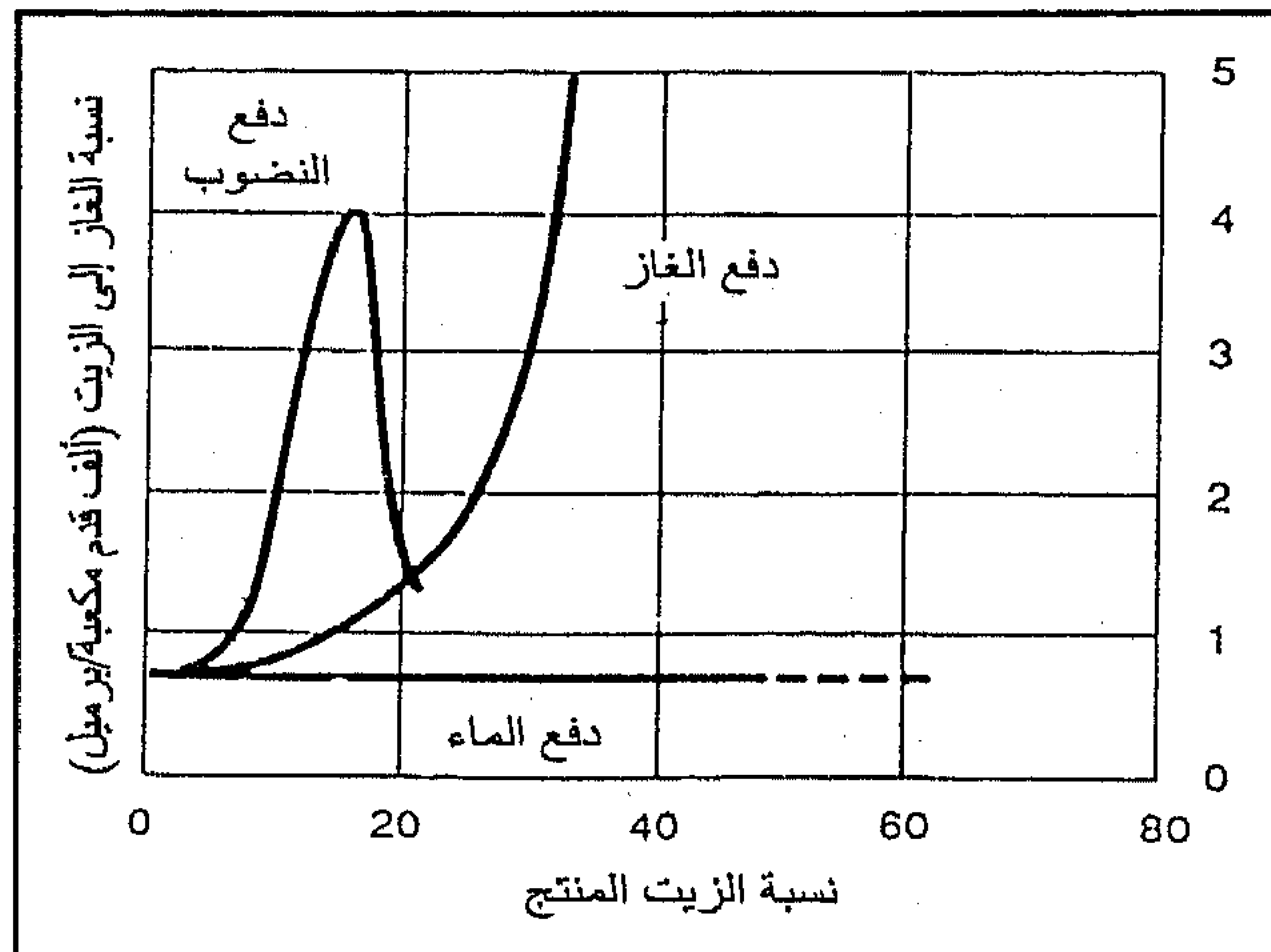
ومع استمرار سحب الزيت من الخزان ينخفض ضغطه عادة وتهبط بالتالي طاقات الآبار مع الإنتاج، والدور الذي يقوم به الغاز والماء في دفع الزيت من الخزان يؤثر تأثيراً كبيراً في سرعة هبوط ضغط الخزان وبالتالي في معدل الإنتاج وكمية الزيت المستخرج، وعلى هذا الأساس يمكن تقسيم الخزانات الجوفية وتصنيفها حسب آلية دفع الموائع بداخلها والتي تشمل الدفع بالماء والدفع بغاز الخزان والدفع بالغاز الذائب والتصريف بالجاذبية، وغالباً ما يكون للخزان خصائص اثنتين أو أكثر من هذه الآليات، ولكن إحداها هي الغالبة بوجه عام، ومن ثم وجب النظر إلى كل آلية على حدة. ويبين الشكلان (٢٣-٢ و٢٣-٣) اتجاهات ضغط الخزان وكذلك نسب الغاز إلى الزيت في حالات آليات الدفع الثلاثة الرئيسة، كما يوضح الجدول الآتي حدود الاستخلاص الأقصى ultimate recovery حسب آلية الدفع drive mechanism داخل الخزان الجوفي:

جدول:

الآلية	مصدر الطاقة	الاستخلاص (٪)
الدفع بالغاز الذائب	تمدد الغاز الذائب	٥ — ٣٠
الدفع بالغاز الطليق	تكون قلنسوة الغاز وتمدد الغاز	٢٠ — ٤٠
الدفع بالماء	تمدد الخزان المائي	٣٥-٧٥
التصريف بالجاذبية	الجاذبية الأرضية	٥ — ٣٠



شكل ٢٣-٢: تدني ضغط الخزان الجوفي مع تقدم الإنتاج تبعاً لآلية الدفع.



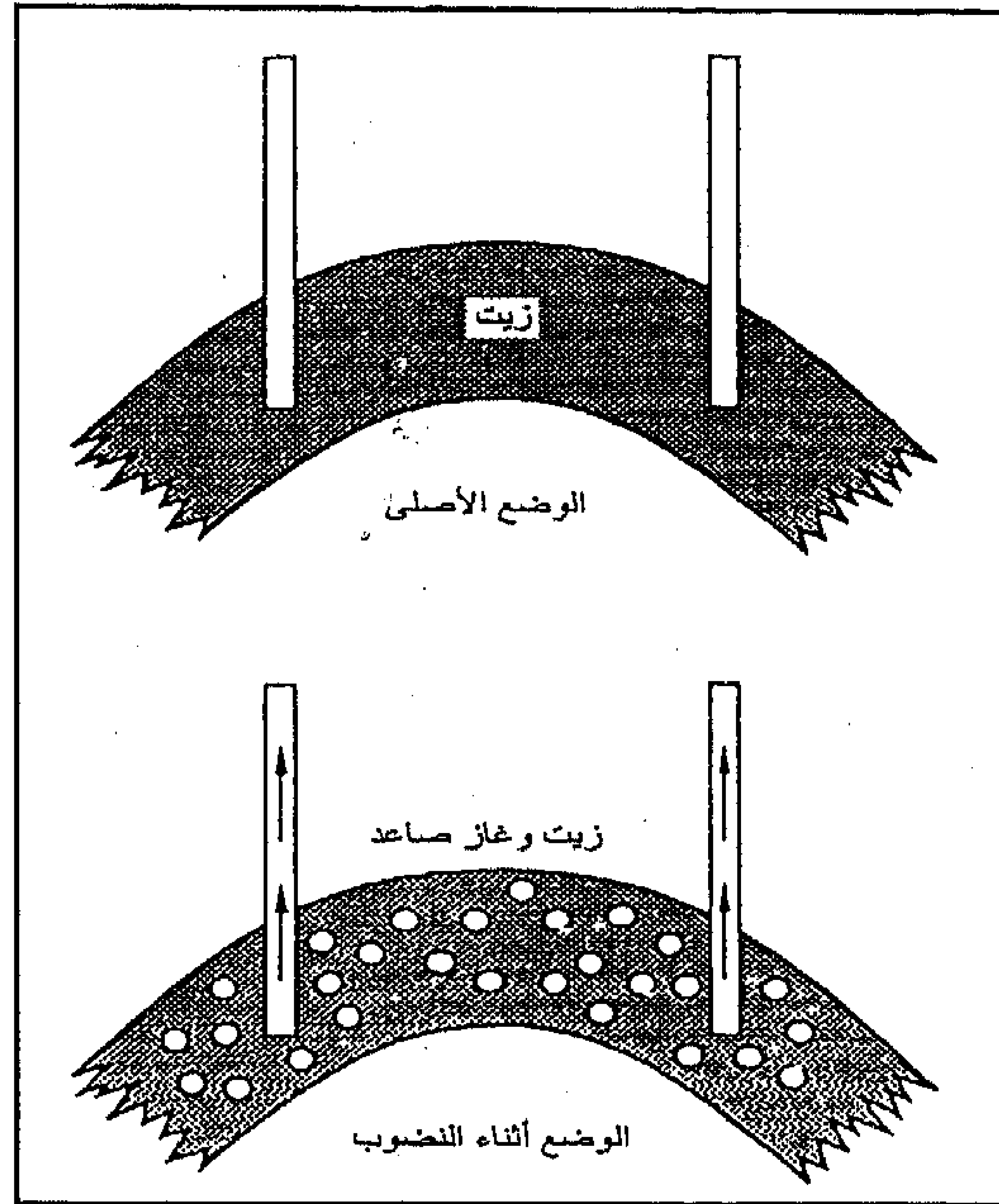
شكل ٢٣-٣: تباين نسبة الغاز إلى الزيت مع تقدم الإنتاج تبعاً لآلية الدفع.

آليات الدفع المختلفة:

- **الدفع بالغاز الذائب:**

يشكل الغاز الذائب في الزيت المصدر الرئيس للطاقة لدفع الزيت من الخزان الجوفي إلى داخل البئر المنتجة، حيث يتسبب إنتاج الزيت في انخفاض ضغط الخزان إلى ما دون "ضغط التشبع" saturation pressure (bubble point pressure) وهو الضغط الذي عنده يبدأ الغاز بالإنطلاق من الزيت، ويتم الحصول على الطاقة اللازمة لدفع الزيت من التمدد المستمر لهذا الغاز الناتج عن انخفاض الضغط، وهكذا يضطر الزيت مع الزائد من الغاز إلى الاندفاع نحو البئر، إلا أن الخزان الجوفي لا يستمر طويلاً في عطائه الإنتاجي بسبب

ما يعتريه من تدهور بالغ السرعة في كل من ضغط الخزان ومعدل إنتاجه كما هو موضح بالشكل ٢٣-٢، لذا يطلق أحياناً على هذا النمط من الدفع بدفع النضوب solution-gas, or depletion drive، وحيث تتعاظم نسبة الغاز إلى الزيت مع قرب نهاية الإنتاج من الخزان (راجع الشكلين ٢٣-٣ و٢٣-٤)، كما أن تدفق الزيت من الخزان بصورة طبيعية قد لا يستمر طويلاً وتستدعي الحاجة عندئذ استخدام المضخات وربما أيضاً إغلاق البئر لفترة زمنية لاستعادة نشاطها الإنتاجي وعلى الأخص عندما تبدأ البئر في إنتاج كميات غير اعتيادية من الغاز، ولكن مهما بلغت دقة الإجراءات فإن هذا النوع من الدفع بالغاز dissolved-gas drive غير فعال نسبياً، كما أن ما يمكن استخلاصه من الزيت الأصلي أقل بكثير مما يمكن استخلاصه من أنواع الدفع الأخرى، وفي بعض الأحيان قد يتكون غطاء أو قلنسوة ثانوية من الغاز secondary gas cap بسبب انطلاق كميات كبيرة من الغاز الذي كان ذائباً في الزيت، هذا ويتميز إنتاج الخزانات بواسطة هذا النوع من الدفع بضآلة كميات الماء المنتجة مع الزيت أو حتى انعدامها.

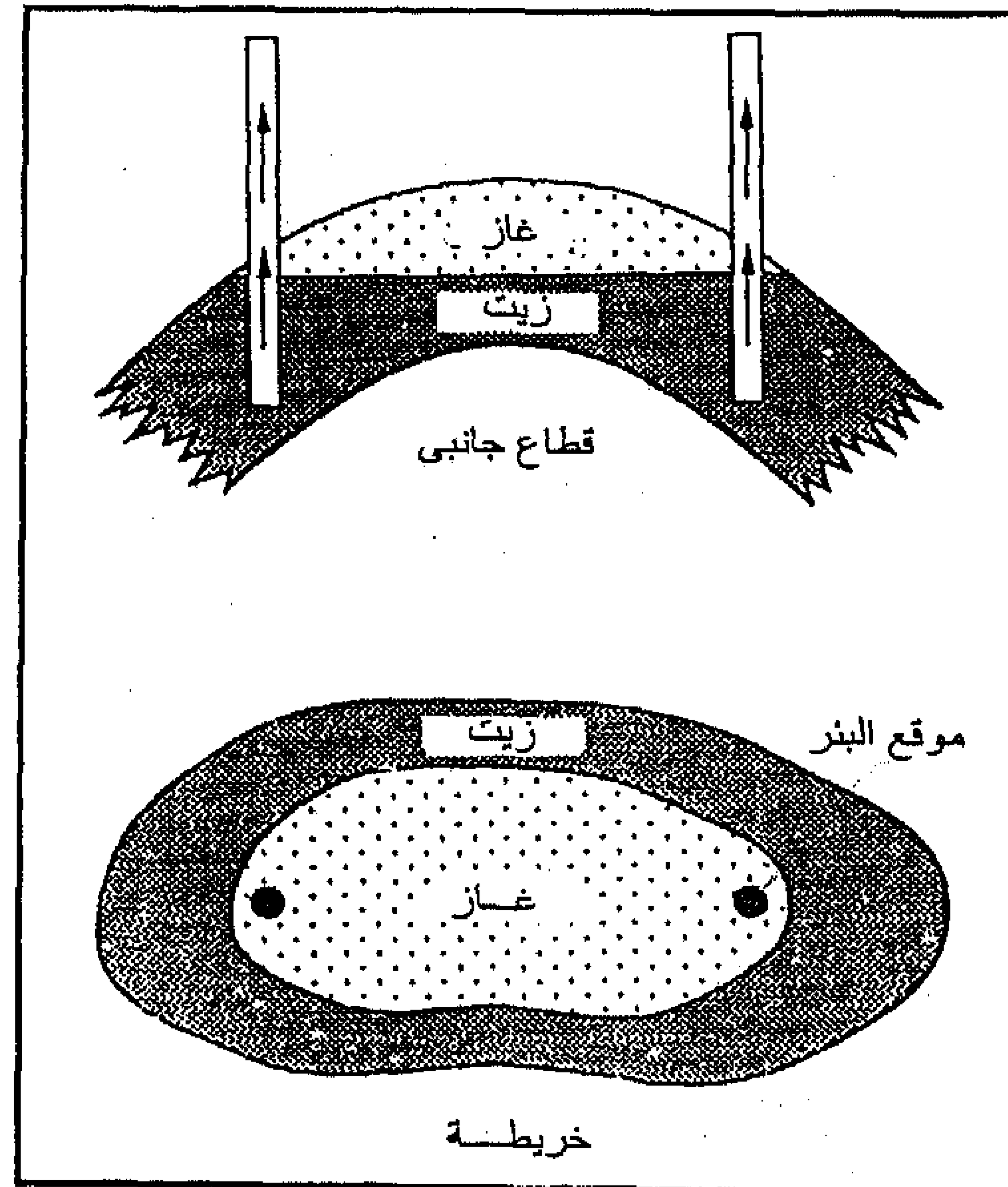


شكل ٢٣-٤: دفع النضوب داخل الآبار.

- **الدفع بالغاز الطليق:**

يعزي مصدر الطاقة الرئيس لنقل الزيت إلى تمدد الغاز الطليق بالخزان free gas-cap expansion وينشأ هذا التمدد من الانخفاض الذي يصيب الضغط في الخزان مع تقدم

عملية الإنتاج من طبقة الزيت تحت الغاز (راجع الشكلين ٢٣-٢ و٢٣-٣)، وبينما يتمدد غاز الخزان فإنه يدفع الزيت أمامه إلى داخل البئر، ومع استمرار الإنتاج وانخفاض ضغط الخزان يتمدد الزيت داخل الخزان وينطلق منه الغاز الذي كان ذائباً به حيث يعمل كداعم إضافي لغاز الخزان أعلى الزيت، إلا أنه وبسبب وجود المناطق ذات الضغط المنخفض حول الآبار المنتجة يمكن أن يسحب هذا الغاز إلى تلك الآبار ويتم إنتاجه مع الزيت، ويفضل في هذه الحالة الحد من معدلات الإنتاج حتى يتهيأ الغاز المنطلق إلى الانتقال إلى غاز الخزان كطاقة دفع إضافية، ونظراً لهذا السلوك الإنتاجي فإنه ينصح أن تكون مواقع الآبار على جوانب البركة البترولية لا على قمتها كما هو موضح بالشكل ٢٣-٥، وحتى مع هذا فإن تماس الزيغاز سيصل مع الوقت إلى أعلى الآبار في المصيدة حيث يتطلب الأمر إغلاق هذه الآبار لتجنب تبديد طاقة الخزان الجوفي، ومن ناحية أخرى إذا كانت منطقة تماس الزيغاز قريبة من البئر فإن الإفراط في إنتاج البئر قد يؤدي إلى هروب الغاز نزولاً نحو البئر ومن ثم انخفاض معدل الإنتاج من الزيت. لذا كان الحرص دائماً عند التعامل مع هذا النوع من الدفع بغاز الخزان أن يكون التركيز على الجزء المحتوي على الزيت من الخزان بعيداً عن قلنسوة الغاز الطليق المصدر الرئيس لطاقة الدفع، ومثل حالة الدفع بالغاز الذائب تكون كميات الماء المنتجة مع الزيت معدومة أو لا تكاد تذكر، كما أن استخلاص الزيت من الخزان الجوفي على درجة معقولة.

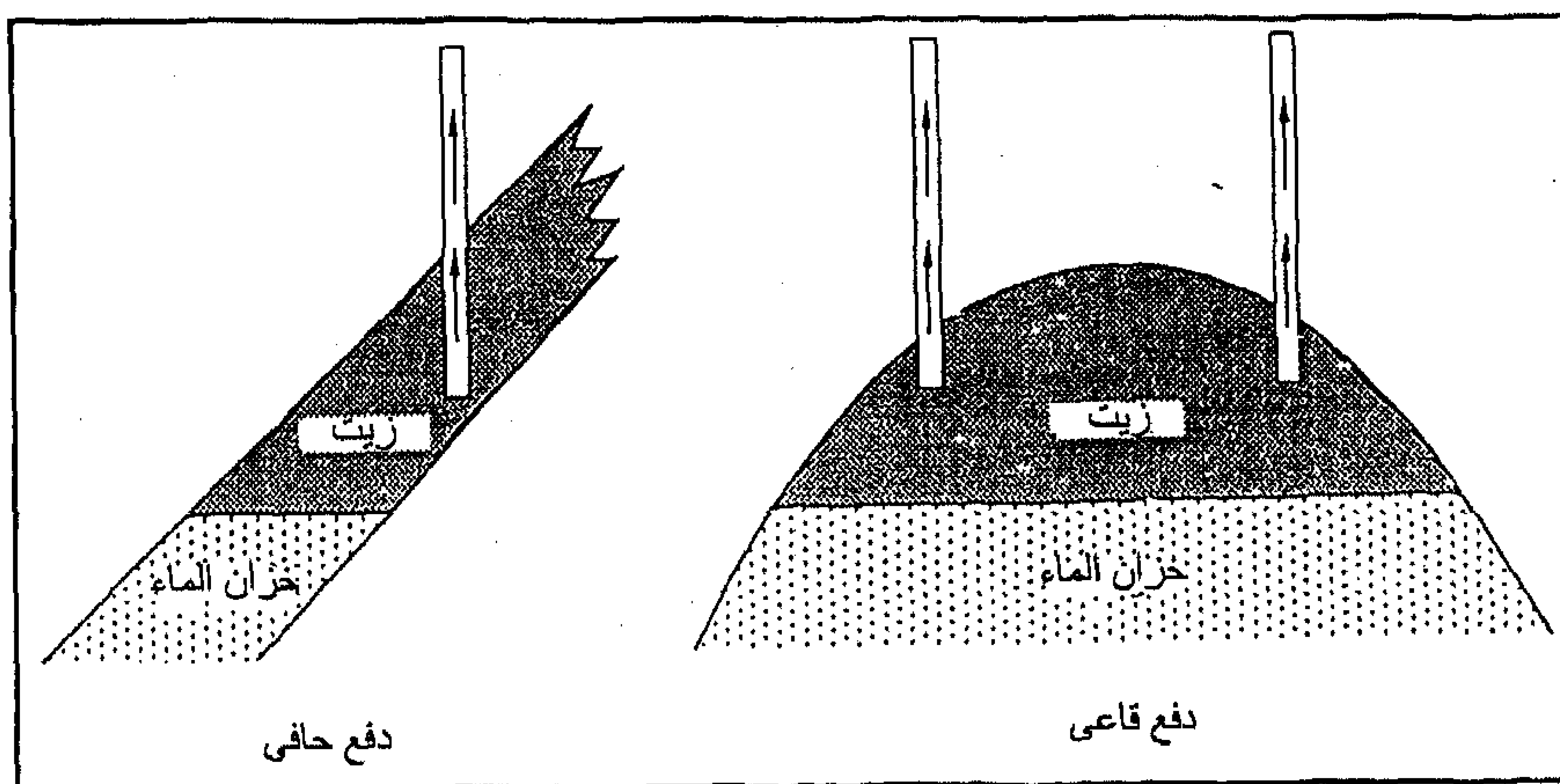


شكل ٢٣-٥: الدفع بالغاز الطليق.

- **الدفع بالماء:**

يحدث هذا النوع من الدفع بالماء natural water drive عند وجود امتداد كبير للخزان الجوفي وأن حجم الماء أسفل الزيت ضخم مقارنة بحجم الزيت (وربما وصل إلى عشرة أمثال أو أكثر)، كما أن للماء القدرة على التحرك والانتقال وأن نفاذية الخزان تسمح بذلك (راجع الشكلين ٢٣-٢ و٢٣-٣).

ومع إنتاج الزيت من الخزان الجوفي يتمدد خزان الماء متسبباً في تحرك الماء إلى داخل عمود الزيت ليحل محل الفراغ الذي أحدثه خروج الزيت المنتج، ولما كانت انضغاطية الماء صغيرة لا بد أن يكون حجم الماء كبيراً حتى تكون هذه العملية فاعلة، وإذا كانت نفاذية الخزان كبيرة فإنه لا يلاحظ في هذا الحالة هبوط يذكر في ضغط الخزان إذ إن الماء يتقدم إلى أعلى على جوانب الخزان جارفاً الزيت أمامه، كما لا يلاحظ أيضاً أي انخفاض تقريباً في معدل الإنتاج في الآبار حتى يبلغها الماء، كما أن عمل الماء الجارف يؤدي إلى استخلاص واستعادة نسبة كبيرة من المخزون الأصلي للزيت، وفي خزانات الزيت التي تنتج بالدفع بالماء ينبغي للآبارالإنهائية ألا تكون قريبة من الموقع الأصلي لتماس الزيماء لئلا تكون حياتها الإنتاجية قصيرة إلى حد غير اقتصادي (شكل ٢٣-٦).



شكل ٢٣-٦: الدفع بالماء.

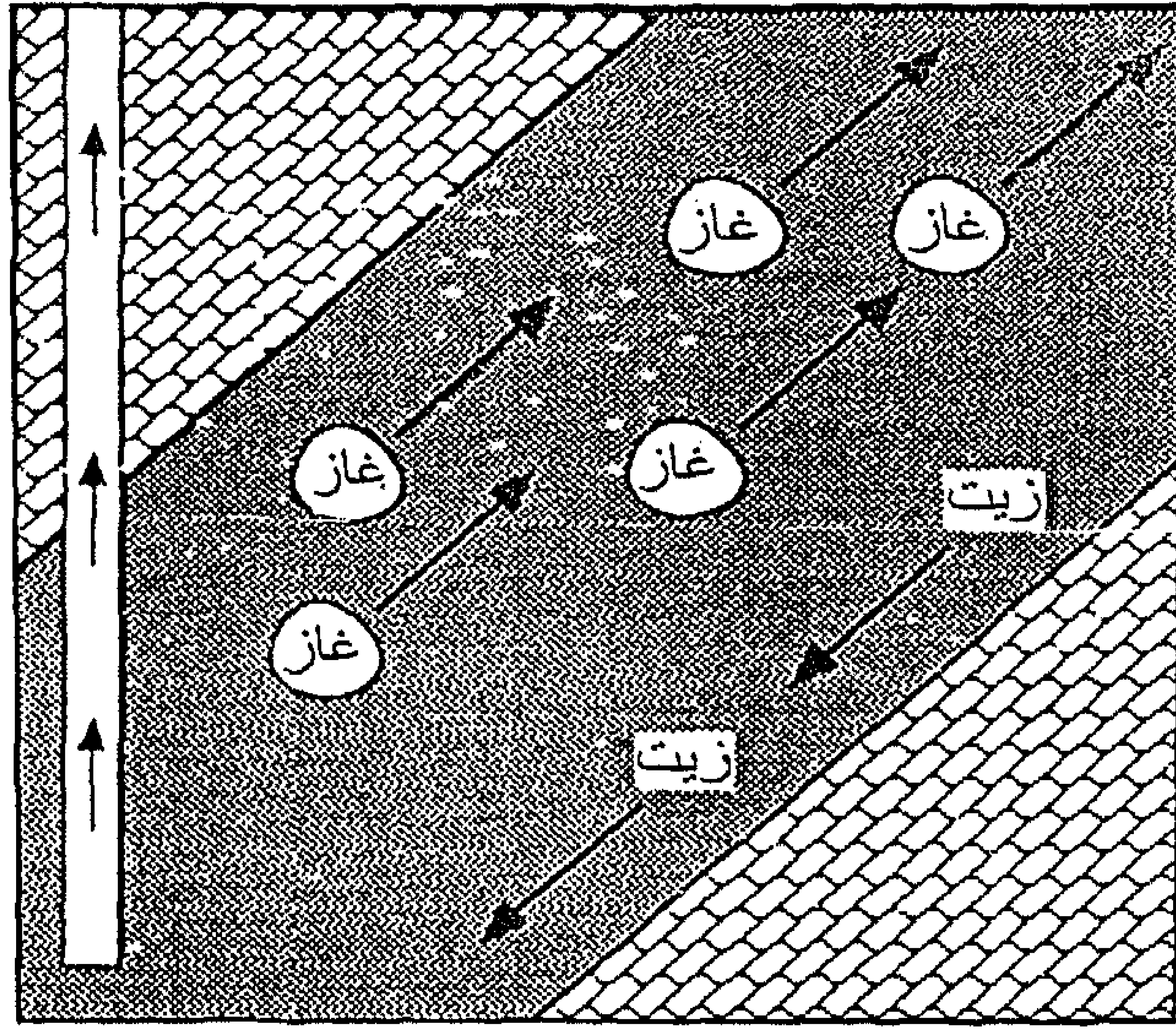
أما إذا كانت نفاذية الخزان المنتج منخفضة كانت معدلات الإنتاج في الآبار أيضاً منخفضة نسبياً فالماء لن يعود جارفاً للزيت كما كان في حالة النفاذية العالية كما أن ضغط الخزان سوف ينخفض نسبياً مما يؤدي بالتالي إلى تدني إنتاجية الآبار.

وبما أن الماء يستطيع الجريان خلال الخزان الجوفي بسهولة تفوق جريان معظم الزيوت الخام نظراً لقلة لزوجته فمن شأن الزيادة المفرطة في معدلات الانتاج أن تؤدي أيضاً إلى تقدم الماء نحو البئر وعلى الأخص إذا كان الزيت شديد اللزوجة وعندئذ تنتج البئر قدراً من الماء يفوق بكثير ما هو متوقع في العادة. وعندما يكون صخر الخزان غير متجانس وذا نفاذية مختلفة فإن الماء سيتقدم بسهولة أكثر في النُّطُق الأشد نفاذية وقد يصل إلى بئر منتجة مجاورة مما قد يؤدي إلى انخفاض إنتاج الزيت إلى مستو غير اقتصادي في حين تكون النطق الأقل نفاذية لم تستنزف بعد إلا استنزافاً جزئياً فقط وتتخذ أقصى التدابير الممكنة لتجنب حدوث ذلك.

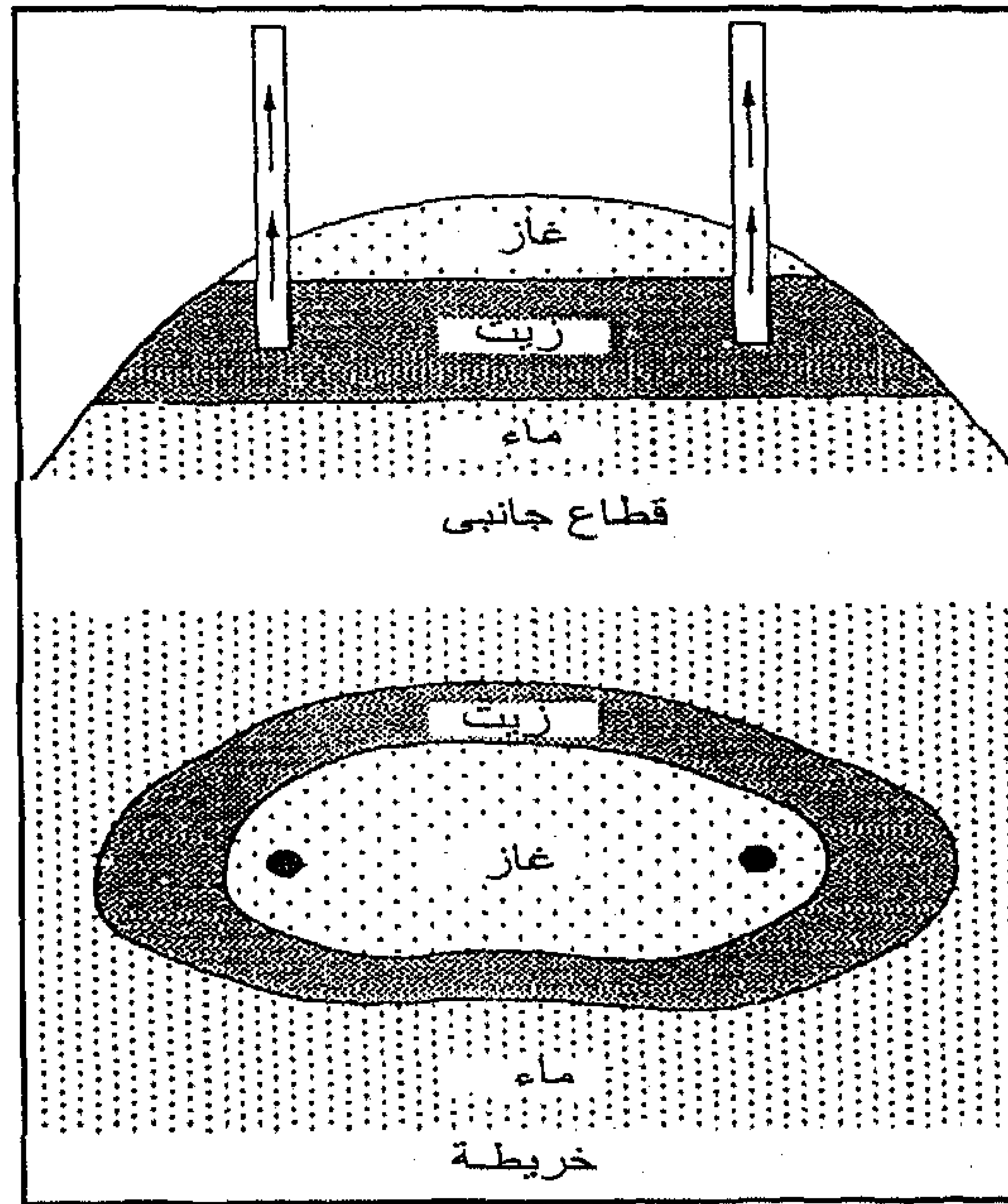
التصريف بالجاذبية:

تعمل الجاذبية كآلية دفع للزيت gravity drainage من الخزان الجوفي فهي عامل مؤثر في جميع الحالات ذلك أن وزن عمود الزيت داخل الخزان يعمل على دفع الزيت للتدفق إلى داخل البئر ولكن يتجلى فعل الجاذبية بشكل كبير خاصة في الخزانات العالية النفاذية وأيضاً ذات الانحدارات والميول الشديدة (شكل ٢٣-٧)، ويشيع الدفع بالجاذبية في الحقول القديمة التي تضاءلت فيها آلية الدفع الأصلية، فالآبار التي أسفل الميل تعطي معدلات إنتاجية أعلى من تلك الموجودة أعلى الميل، وبصورة كبيرة فإن معدلات الإنتاج عن طريق التصريف بالجاذبية أقل عادة مقارنة بالآليات الأخرى إلا أن الاستخلاص الإجمالي للزيت منها ربما كان عالياً كثيراً على مدى فترة زمنية طويلة.

ومن واقع الدراسات الحقلية قد تكون للخزان المنتج أكثر من آلية دفع ويطلق على الخزان في هذه الحالة بأنه ذو آلية دفع مشتركة combination or mixed drive، كما أن ترتيب الأهمية بالنسبة لكل آلية سوف يتغير بمرور الوقت والإنتاج، وفي المراحل المتأخرة من الإنتاج في حقل ذي آلية دفع بالغاز المذاب قد يصبح التصريف بالجاذبية هو الأكثر فاعلية، وقد وجد أن أفضل نظام للدفع المشترك هو آلية الدفع بالغاز الطليق والدفع بالماء حيث يجري اكتساح الزيت من الخزان المنتج من طرفيه العلوي والسفلي معاً. والشكل ٢٣-٨ يوضح مثالاً لذلك حيث يوجد خزان للزيت تعلوه قلنسوة من الغاز ويسفله دفع مائي نشيط.



شكل ٢٣-٧: الدفع بالجاذبية في خزان شديد الميل.

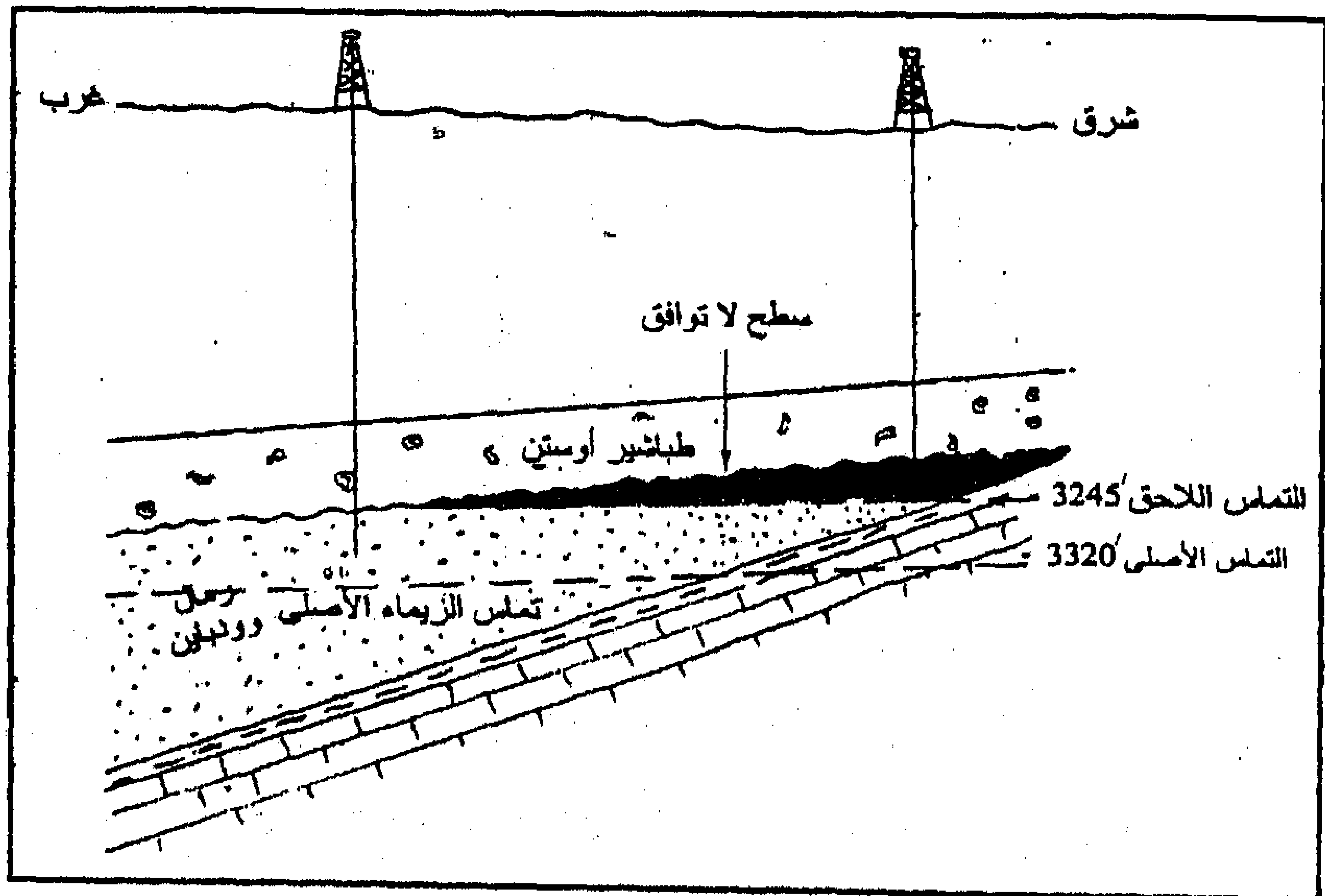


شكل ٢٣-٨: الدفع المشترك بالغاز الطليق والماء الجوفي.

أمثلة حقلية:

من الأمثلة الحقلية التي يمكن أن نسوقها للتدليل على آلية الدفع ما نشاهده في حقل شرق تكساس الذي اكتشف عام ١٩٣٠ وتركز مخزونه الأصلي من الزيت الخام بأكثر من

سبعة بلايين برميل في خزان الحجر الرملي (Woodbine Sandstone) والذي يسفله خزان مائي ضخم يعمل كقوة مائية دافعة للزيت إلى داخل الآبار (شكل ٢٣-٩)، وقد تحدد تماس الزيماء بالحقل آنذاك عند عمق ١٠١٢ متراً (٣٣٢٠ قدماً) تحت سطح البحر، ومع استمرار الإنتاج وحتى عام ١٩٦٥ (أي بعد ٣٥ عاماً من بدء الإنتاج) لوحظ تقدم التماس إلى عمق ٩٨٩ متراً (٣٢٤٥ قدماً) تحت سطح البحر نتيجة آلية الدفع بالماء (شكل ٢٣-٩)، وبسبب التركيب الجيولوجي للحقل فقد أدى ذلك إلى نضوب الآبار الواقعة عند الطرف الغربي للحقل، أما الآبار الشرقية فقد استمرت في إنتاجها للزيت حيث لم يكن تماس الزيماء قد طالها بعد، ويسمى غزو الماء للخزان المنتج الاجتياح المائي water encroachment، وحتى عام ١٩٩٣ كان قد تم إنتاج ٥١٣٥ مليون برميل من الزيت، وتبقى نحو ٤٪ (٢١٠ مليون برميل) من المخزون الأصلي للخام لاستغلالها في فترة لاحقة، والواقع أن الاستعادة الفائقة لما يقرب من ٨٢٪ من الاحتياطي البترولي للحقل ترجع أساساً إلى عدة أمور منها آلية الدفع بالماء المؤثرة والمسامية العالية للحجر الرملي المنتج (٣٠٪) ونفاذية الخزان الكبيرة (١٠٠٠ ملي دارسي في المتوسط) وكذلك انخفاض لزوجة الخام وارتفاع درجة جودته. ويعتبر حقل شرق تكساس من الأمثلة الجيدة لمصايد اللاتوافق الزاوي وحيث كنا قد تناولنا ذلك في الفصل الرابع من هذا الكتاب.



شكل ٢٣-٩: قطاع جانبي في حقل شرق تكساس يوضح آلية الدفع بالماء وحركة تماس الزيماء مع تقدم الإنتاج (١٩٣٠-١٩٦٥).

آلية الدفع في خزانات الغاز:

تكون آلية الدفع في خزانات الغاز الطبيعي إما عن طريق تمدد الغاز نفسه داخل الخزان ويعرف هذا النظام بآلية التمدد بالغاز expansion-gas drive أو ما يطلق عليه أيضاً الآلية الحجمية volumetric drive حيث إن تمدد الغاز ينتج عنه زيادة في الحجم وقدرة أكبر على الدفع، وقد يكون الدفع داخل خزان الغاز عن طريق دفع الماء، مثل ما يحدث في خزانات الزيت، ووجود خزان مائي تحت نطاق الغاز وحيث يكون الفاصل بين الغاز والماء هو تماس الغاماء، وبالطبع فإن الدفع بالماء في هذه الحالة لن يكون بالفاعلية التي كان عليها في حالة خزانات الزيت حيث يختلف نمط تدفق الماء وأسلوب اكتساحه داخل خزانات الغاز.

المعدل الأقصى للفاعلية الإنتاجية:

يعرف المعدل الأقصى للفاعلية maximum efficient rate (MER) بأنه ذلك المعدل الذي عنده يمكن إنتاج البئر أو الحقل دون فقد لطاقة الخزان أو تخط أو تجاوز bypass لمخزونات من الزيت داخل الخزان، وعادة ما يتراوح هذا المعدل بين ٣ و٨٪ من قيمة الاحتياطيات البترولية القابلة للاستخراج في العام، ومن شأنه أن يوفر ارتفاعاً منتظماً في تماس الزيماء ويحافظ أيضاً على نسبة الغاز إلى الزيت عند حدها الأدنى، ويمكن تحديد هذا المعدل عند معرفة نوع آلية الدفع بالخزان المنتج وكذا بعد إجراء اختبارات الإنتاجية لهذا الخزان.

العوامل المؤثرة على آلية الدفع:

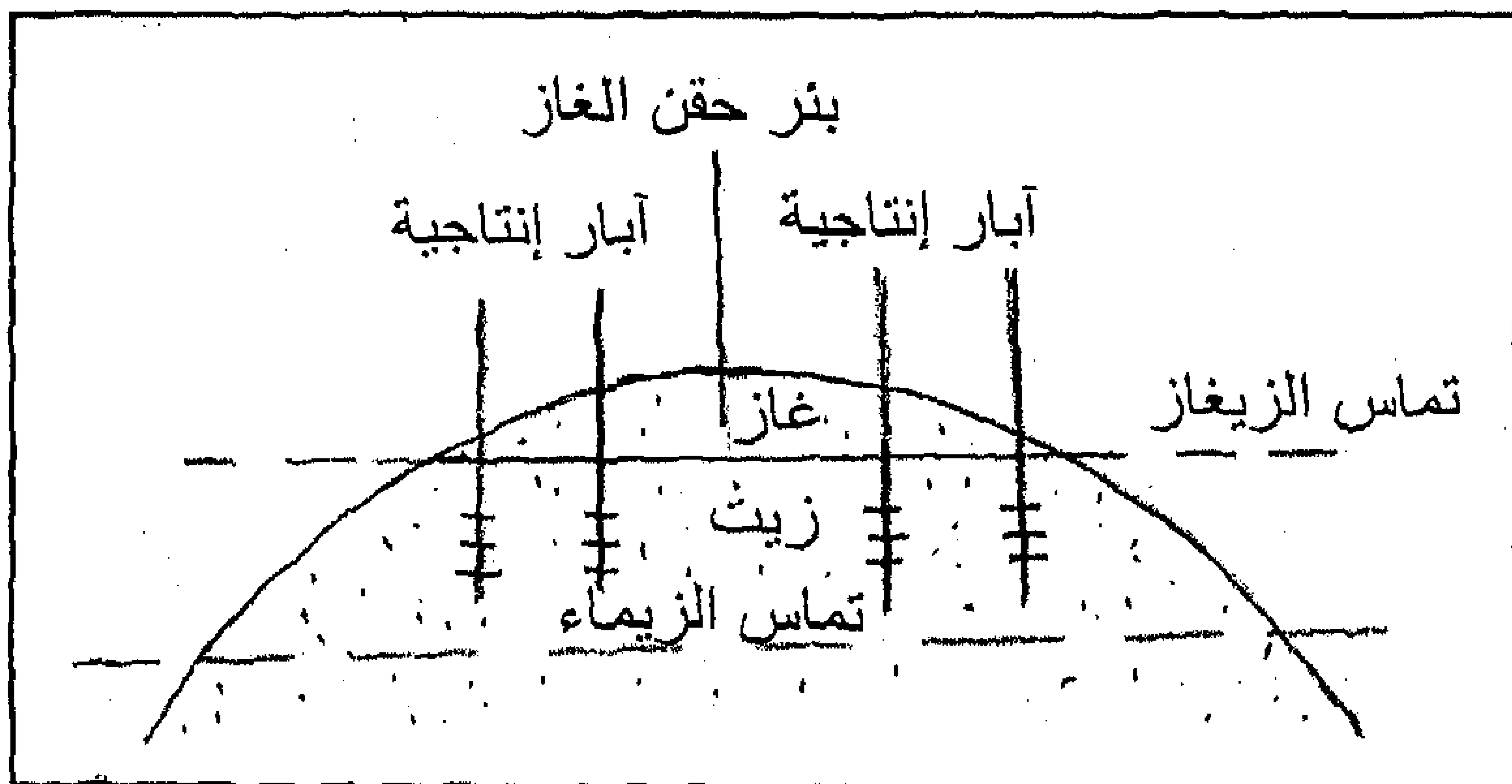
تتوقف آلية الدفع بالخزان البترولي على طبيعة هذا الخزان والخصائص الإنتاجية له، فالخزانات المعزولة مثل الحجر الرملي المحاط بالطفل ورمال رباط الحذاء والشُّعب وكذلك المصايد المقطوعة بالصدوع تكون آلية الدفع فيها بواسطة الغاز المذاب، وإذا كان للخزان الجوفي غطاء من الغاز الطليق نجد أن آلية الدفع هي الغاز الموجود في قمة المصيدة البترولية، وفي حالة غياب هذا الغطاء الغازي فقد يكون الدفع بواسطة الغاز المذاب، أما بالنسبة لخزانات الحجر الرملي وغيرها والتي تتصل من أسفلها بخزانات مائية ضخمة فإنه يغلب عليها آلية الدفع بالماء، وأما تلك الخزانات ذات الضغط العالي والشاذ فيمكن القول بأنها خزانات معزولة وبالتالي لن يكون الدفع بالماء هو الآلية المنتظرة.

كذلك فإنه بمعرفة ضغوط الخزان ومعدلات إنتاج الزيت يمكن تقدير آلية الدفع المحتملة، فالانخفاض السريع في ضغط الخزان ومعدل الإنتاج يعني أن لدينا آلية دفع

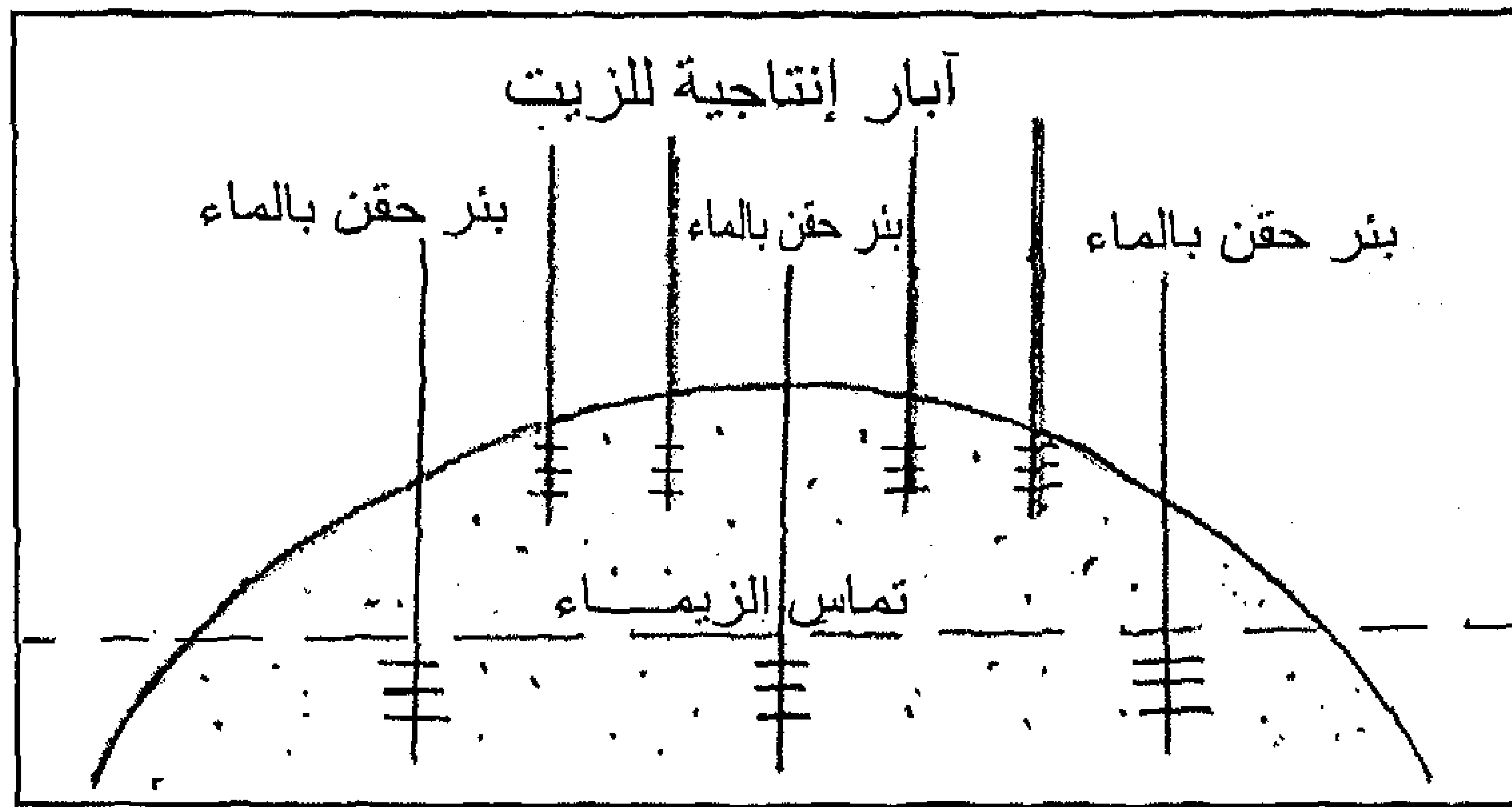
بالغاز المذاب ولن يساعد غلق الآبار عندئذ في بناء ضغط الخزان، أما بالنسبة للدفع بالماء فإن ضغط الخزان ومعدل الإنتاج يبقيان في وضع مستقر، وإذا ما حدث انخفاض ما فإن غلق البئر في هذه الحالة سوف يساعد على استعادة الخزان لضغطه الأصلي وكذا معدل إنتاج البئر من الزيت.

الدفع الاصطناعي:

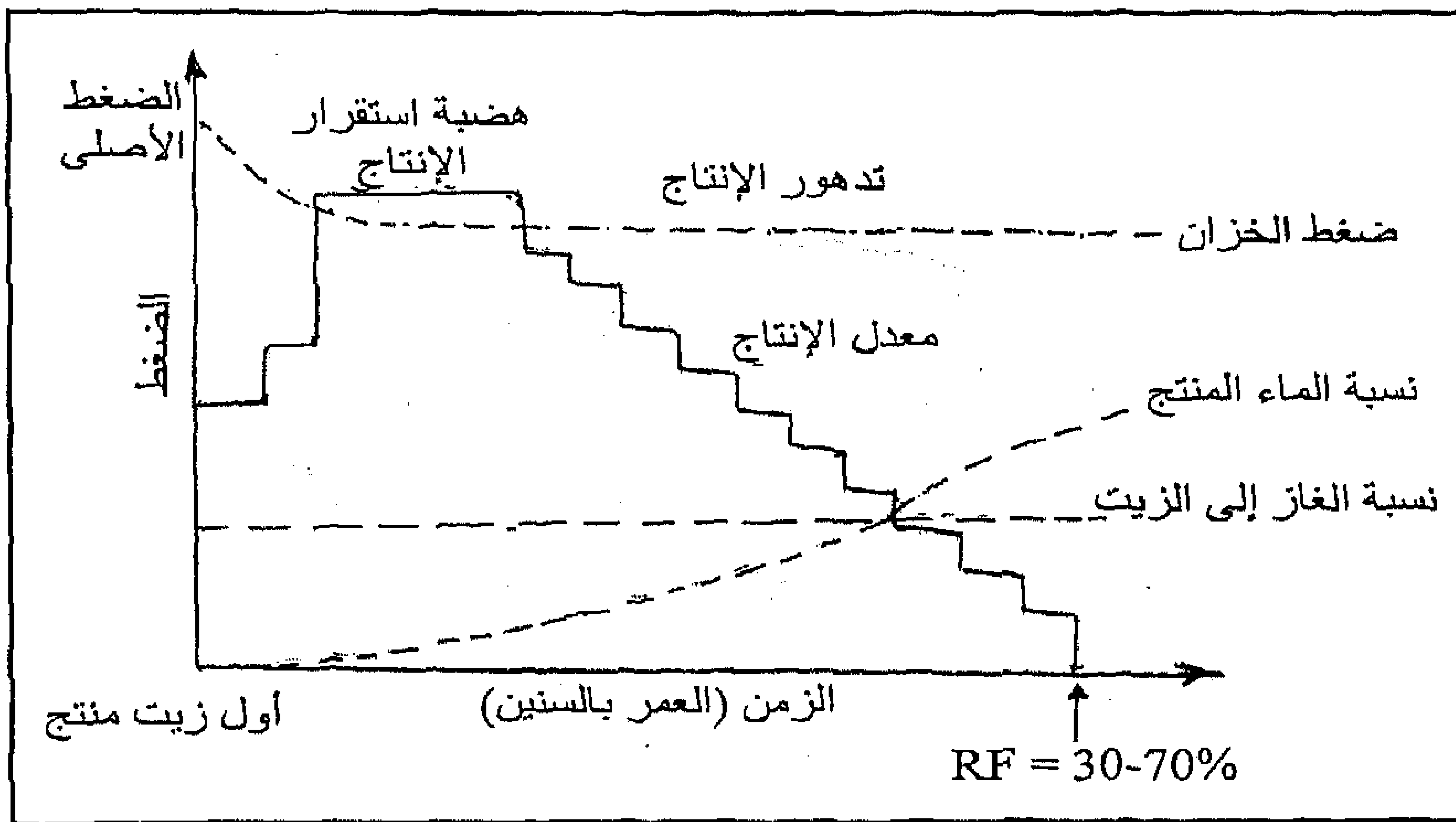
يمكن استحداث آلية دفع اصطناعية artificial drive بعد تدهور الآلية الطبيعية وذلك باستخدام الغاز أو الماء، ففي الخزانات الجوفية التي تحتوى على غطاء من الغاز يمكن أن تعزز الآلية بواسطة إعادة حقن الغاز المنتج أو عن طريق مصدر غاز خارجي، وفي هذه الحالة يكون موقع بئر الحقن injection well عند قمة التركيب الجيولوجي للحقل وفي داخل قلنسوة الغاز الموجودة هناك كما هو موضح بالشكل ٢٣-١٠، أما في حالة الخزانات ذات الدفع بالماء والتي تدنت في كفاءتها فيمكن حقن الماء water injection داخل نطاق الماء لتجنب أية تجاوزات للمناطق المشبعة بالزيت، وإذا كانت النفاذية قد تناقصت في الجزء المحتوي على الماء من الخزان بسبب ما اعترى الصخر من انضغاط أو أية عمليات أخرى لاحقة أثرت على خصائصه البتروفيزيائية فإنه يمكن حينئذ ضخ الماء داخل نطاق الزيت (شكل ٢٣-١١)، وعند البدء في استخدام الماء كآلية معززة للدفع داخل الخزان المنتج فإن تأثير الخزان المائي كقوة دافعة يصبح غير ذي فاعلية، لذا فإن المعرفة المبكرة لمدى استجابة الخزان المائي ستعمل على وضع الخطة المناسبة لتنمية الحقل، والحل السائد في هذه الأحوال أن يبدأ إنتاج الحقل عن طريق النضوب الطبيعي natural depletion ثم إقامة تسهيلات الحقن في حالة ما إذا لم تكن هناك مساندة كبيرة من الخزان الجوفي المائي aquifer.



شكل ٢٣-١٠: موقع بئر حقن الغاز بالنسبة للآبار الإنتاجية.



شكل ٢٣-١١: مواقع آبار الحقن بالماء بالنسبة للآبار الإنتاجية.



شكل ٢٣-١٢: دورة حياة الحقل البترولي وتدهور الإنتاجية مع الوقت.

ومن شأن تأثير الحقن بالماء الحفاظ على ضغط الخزان قريباً من ضغطه الأصلي مما يتيح فترة إنتاجية أطول ودون تناقص كبير في معدلات الإنتاج، كما أنه سوف يعمل على عدم تزايد نسبة الغاز إلى الزيت، ولكن قد يلاحظ من ناحية أخرى زيادة كبيرة في نسبة الماء المنتج (شكل ٢٣-١٢) water cut والتي قد تكون سبباً رئيساً لهجر الحقل، وقد تصل هذه النسبة إلى أكثر من ٩٠٪ في نهاية حياة الحقل الإنتاجية، أما عامل الاستعادة أو الاستخلاص (RF) recovery factor فإنه يتراوح بين ٣٠-٧٠٪ تبعاً لكفاءة الماء المحقون وفاعليته في اكتساح الزيت من الخزان المنتج، وهو ما يعتبر حافزاً إضافياً في تعظيم إنتاجية الحقل قبل هجره.

الفصل الرابع والعشرون

إنتاج الزيت الخام والغاز الطبيعي واختبار وتنشيط الآبار

خطة التنمية والإنتاج:

يدخل إنتاج الآبار من الزيت الخام والغاز الطبيعي ضمن المرحلة التالية للاستكشاف وفق خطة وضعت لهذا الغرض يطلق عليها خطة تنمية الحقل field development plan (FDP) والتي تشمل ضمن إطارها الكيفية التي سيتم بموجبها استغلال الحقل المكتشف للحصول على العائد الاقتصادى الأمثل، وتلقى المهمة الأولى في هذا الشأن على كاهل إدارة الإنتاج بالشركة العاملة، وتحقيق الأهداف الرئيسة لها والتي منها المحافظة على المعدلات اليومية للإنتاج وجودة المنتج ومطابقته للمواصفات المتفق عليها في التعاقدات وكذا الالتزام بمعايير السلامة والحفاظ على البيئة، ومن المتعارف عليه ألا تزيد نسبة الرواسب والماء في الزيت المنتج عن ٠.٥٪ والملوحة في حدود ٧٠جم/ متر٣، كما لا ينبغي، عند التخلص من الماء في البحر، ألا تزيد نسبة الزيت به عن ٤٠ جزء في المليون. وفي الآونة الأخيرة شاع استخدام الحاسوب في عمليات الإنتاج وتشغيل الآبار عن طريق ما يعرف بالعمليات المدعمة بالحاسب الآلي computer assisted operations (CAO) حتى أصبح في بعض الأحيان وعلى الأخص في المناطق البحرية والآبار النائية استخدام هذه الأساليب دون التدخل البشري وإدارة هذه الأمور من المناطق البرية بواسطة برامج معدة لخدمة تلك الأغراض.

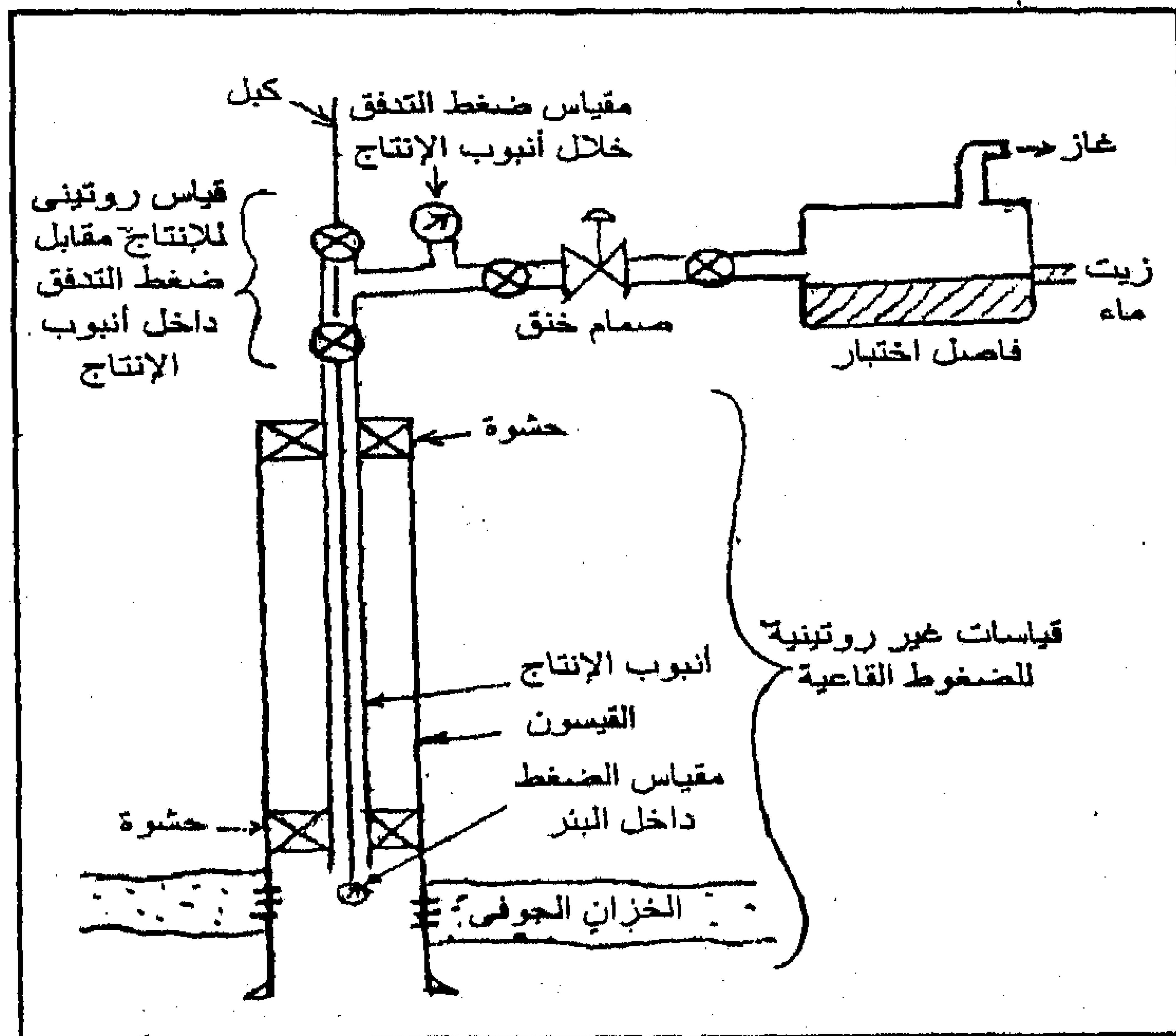
وتشير الإحصاءات التي جرت مؤخراً بأن ثمة ما يزيد عن مليون بئر منتجة في العالم وتمثل الولايات المتحدة نحو ٦٠٪ منها وكندا ٥٪ والشرق الأوسط نحو ٠.٢٪، كما أن عدد الآبار المنتجة للزيت يصل إلى ضعف عدد الآبار المنتجة للغاز، ولا يعني ارتفاع عدد الآبار المنتجة في بلد ما تَفَوُّق هذا البلد من حيث الإنتاج على بلد آخر، فالبئر الواحدة في الشرق الأوسط مثلاً قد تتفوق في معدلها الإنتاجي عشرات المرات مقارنة ببئر منتجة في الولايات المتحدة أو كندا مثلاً.

وفي عمليات الإنتاج يتجلى الدور الذي يقوم به مهندس الإنتاج وأيضاً مهندس الخزانات على وجه الخصوص، فالهدف هو تعظيم إنتاجية الخزان الجوفي دون استنزافه

على وجه السرعة وتحقيق أفضل عائد مادي ، وفي هذا الشأن يبرز ضرورة الحفاظ على ضغط الخزان وخصائصه الخزانية الأخرى على مدى أطول فترة زمنية ممكنة.

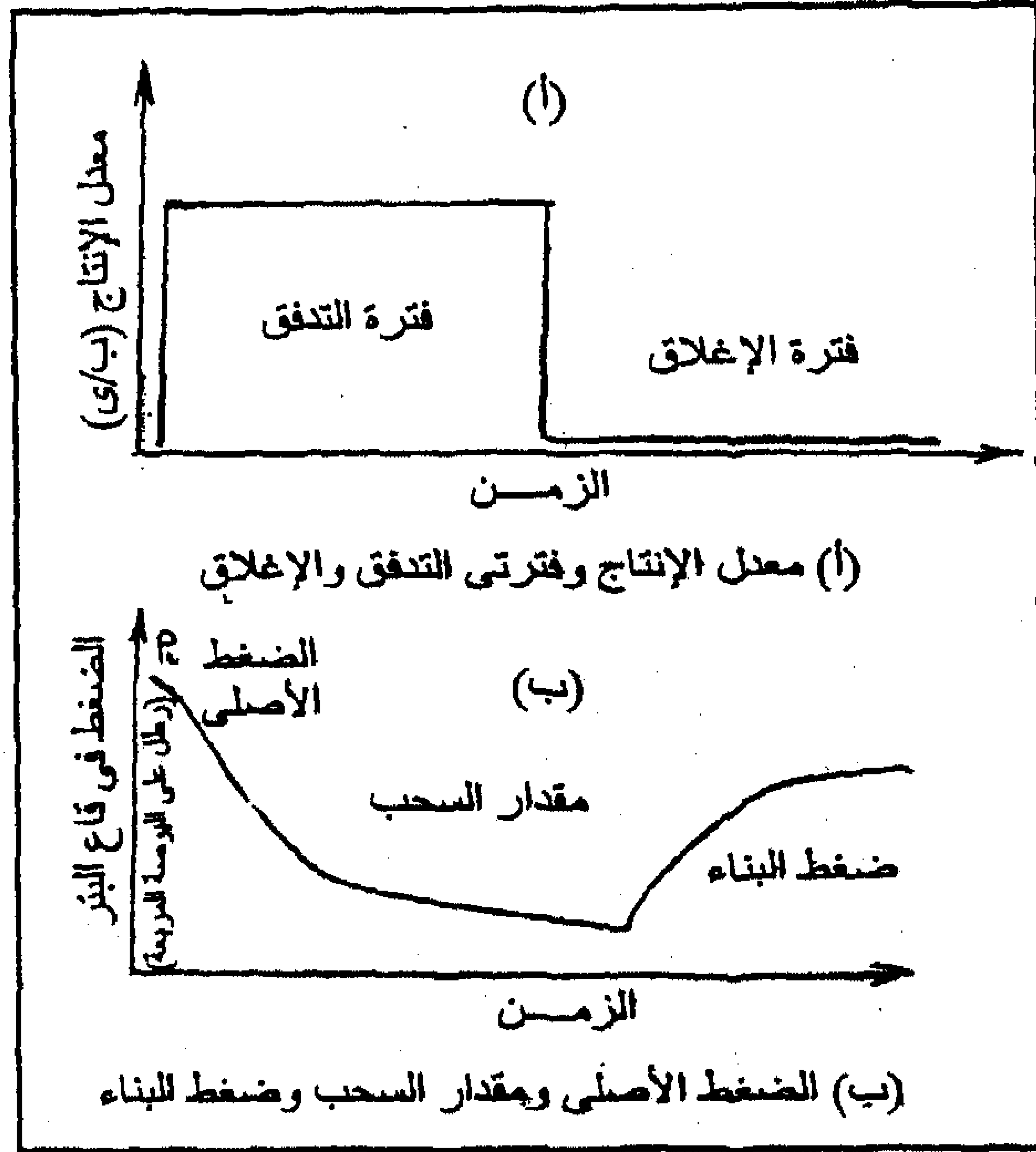
الضغوط في الآبار والخزانات:

عند التعامل مع عمليات الإنتاج من المفيد بل من الضروري معرفة عدد من المصطلحات التي تتناول أنواع الضغوط البئرية لما لها من تأثيرات على أعمار الخزانات المنتجة وكذا تدفق الخام إلى السطح، فهناك مثلاً الضغط داخل أنبوب الإنتاج tubing pressure وضغط القيسون casing pressure. ويُقاس ضغط أنبوب الإنتاج على السطح بواسطة مقياس الضغط أعلى شجرة الإنتاج أما الضغط في قاع البئر bottomhole pressure فيتم قياسه أثناء تدفق البئر ويعرف بضغط التدفق flowing pressure (شكل ٢٤-١ و٢٤-٢)أو أثناء غلق البئر (أي حالة السكون) ويعرف بضغط الإغلاق أو ضغط السكون shut-in or static pressure وذلك بعد غلق البئر واستقرارها لفترة قد يصل إلى ٢٤ ساعة أو أكثر قليلاً، أما السحب الهابط downdraw فهو الفرق بين ضغط السكون (الإغلاق) وضغط التّدفق داخل البئر، كما سبق أن أشرنا في الفصل الـ ١٨.



شكل ٢٤-١: اختبار الضغط في قاع البئر.

ويسمى الضغط الأصلي في الخزان قبل بدء الإنتاج بالضغط الابتدائي أو الأصلي virgin, initial or original pressure ويتناقص ضغط الخزان مع الإنتاج ويمكن قياسه في أي وقت أثناء الإنتاج وذلك بواسطة جهاز لقياس الضغط يدلى بواسطة كبل كهربائي ويسمى هذا الجهاز بمقياس الضغط pressure bomb، كما يمكن قياس درجة الحرارة أيضاً بآلة مصاحبة له.



شكل ٢٤-٢: اختبار ضغوط الهبوط والبناء ومعدلات الإنتاج.

اختبارات الآبار:

هناك العديد من الاختبارات التي تجري للآبار well testing وتختلف حسب الغرض من الاختبار، فمن هذه الاختبارات ما يهدف إلى التعرف على الطاقة الإنتاجية للبئر ومنها ما يتم اجراؤه لمعرفة معدلات التدفق للسوائل المنتجة ومنها ما يهدف إلى قياس ضغط الخزان الجوفي وكذلك معرفة قابلية البئر للتصريف.

وفي مقدمة هذه الاختبارات ما يعرف باختبار الجهد potential test لتعيين الطاقة الإنتاجية للبئر، ومن هذا الاختبار يمكن تحديد الحد الأقصى من الغاز والزيت اللذين يمكن إنتاجهما خلال ٢٤ ساعة، ويتم أيضاً إجراء هذا الاختبار بصورة دورية لمتابعة أداء

البئر من الناحية الإنتاجية، وهناك اختبار الإمكانية الإنتاجية productivity test وهو يهدف إلى تعيين مدى تأثيرات المعدلات الإنتاجية المختلفة على الخزان الجوفي، ويمكن إجراء هذا الاختبار باستخدام تجهيزات الاختبار من النوع المتنقل ويتم في هذا الاختبار قياس ضغط الموائع داخل البئر عند إغلاقها وكذا خلال فترات متعددة من معدلات الإنتاج المختلفة، وتستعمل هذه القياسات في حساب معدلات التدفق المطلقة وكذلك المعدلات القصوى التي يمكن للبئر تحقيقها بشرط عدم إحداث أي ضرر للخزان.

وفي حالة الآبار التي ترتبط بوحدة معالجة مركزية يمكن إجراء اختبارات إنتاج production tests بهدف تحديد إنتاجية كل بئر على حدة، وتتضمن المعطيات الواردة من هذا الإختبار مقدار كمية الزيت المنتج والماء المنتج ومعدل تدفق الغاز ونسبة الغاز إلى الزيت وأيضاً ضغط أنبوب الإنتاج. أما بالنسبة لبئر الغاز فإن الاختبار يشمل معلومات عن معدل تدفق الغاز وكمية المتكثفات المنتجة وكمية الماء المنتج وضغط أنبوب الإنتاج وكذا نسبة المتكثفات إلى الغاز. كذلك فهناك اختبارات الضغوط العابرة أو العارضة pressure transient testing والتي تتضمن قياسات الضغوط ومعدلات التدفق، ومن هذه الاختبارات ما يعرف باختبار مقدار السحب drawdown test والذي يهدف إلى قياس الضغط داخل البئر أثناء غلقها والتغير في هذا الضغط عند إعادة فتح البئر ووضعها على الإنتاج وكذلك اختبار بناء الضغط buildup test الذي يعنى بقياس وضغط البئر وأيضاً عند غلقها حتى يصل هذا الضغط إلى حالة مستقرة، وهناك أيضاً ما يعرف بالاختبار المتعدد المعدلات multirate test والذي يقاس خلاله ضغط التدفق للبئر عند معدلات تدفق مستقرة، ولقد أشرنا إلى بعض من هذه الاختبارات في الفصل الثامن عشر.

وفي هذا الشأن هناك ما يعرف بالقابلية للتصريف deliverability وهي قدرة الخزان على تحريك الموائع إلى داخل البئر عند ضغط تدفق معين، ويعرف معدل التدفق الأقصى للبئر maximum potential flow بأنه ذلك المعدل الذي يمكن للبئر أن تصل إليه عندما يكون الضغط داخل البئر صفراً، وهو في الحقيقة معدل نظري يمكن حسابه من البيانات الواردة من الاختبارات المتعددة المعدلات. كذلك فهناك ما يعرف بدليل الإنتاج productivity index (PI) للبئر وهو عبارة عن ضغط السحب مقدراً بالرطل على

البوصة المربعة مقسوماً على معدل الإنتاج (برميل/ يوم)، وللآبار البرية دليل إنتاج أكثر من ١،٠ رطل على البوصة المربعة/ برميل/ يوم، بينما يرتفع هذا الدليل في الآبار البحرية ليصل إلى أكثر من ٠،٥.

وهناك علاقة تسمى أداء التدفق inflow performance relationship (IPR) وهو يشبه دليل الإنتاج حيث أن هذه العلاقة تربط بين ضغط السحب ومعدل الإنتاج ولكنه يكون أكثر دقة حيث إن هذه العلاقة تأخذ في اعتبارها آلية الدفع داخل الخزان المنتج وكذا نسبة الغاز إلى الزيت والتغيرات في النفاذية النسبية مع الإنتاج.

وإضافة إلى الآبار المنتجة للزيت يتم معاملة الآبار المنتجة للغاز بطريقة مشابهة حيث تجرى لها اختبارات الإنتاجية بشكل روتيني وتحدد أيضاً كميات الغاز المنتجة وكذا كميات المتكثفات والمياه المصاحبة، أما اختبار الضغط المرتد back-pressure test فهو يقيس ضغط الإغلاق والضغوط الأخرى عند معدلات تدفق مستقرة وذلك بهدف معرفة قابلية البئر للتصريف.

التسجيلات داخل آبار الإنتاج:

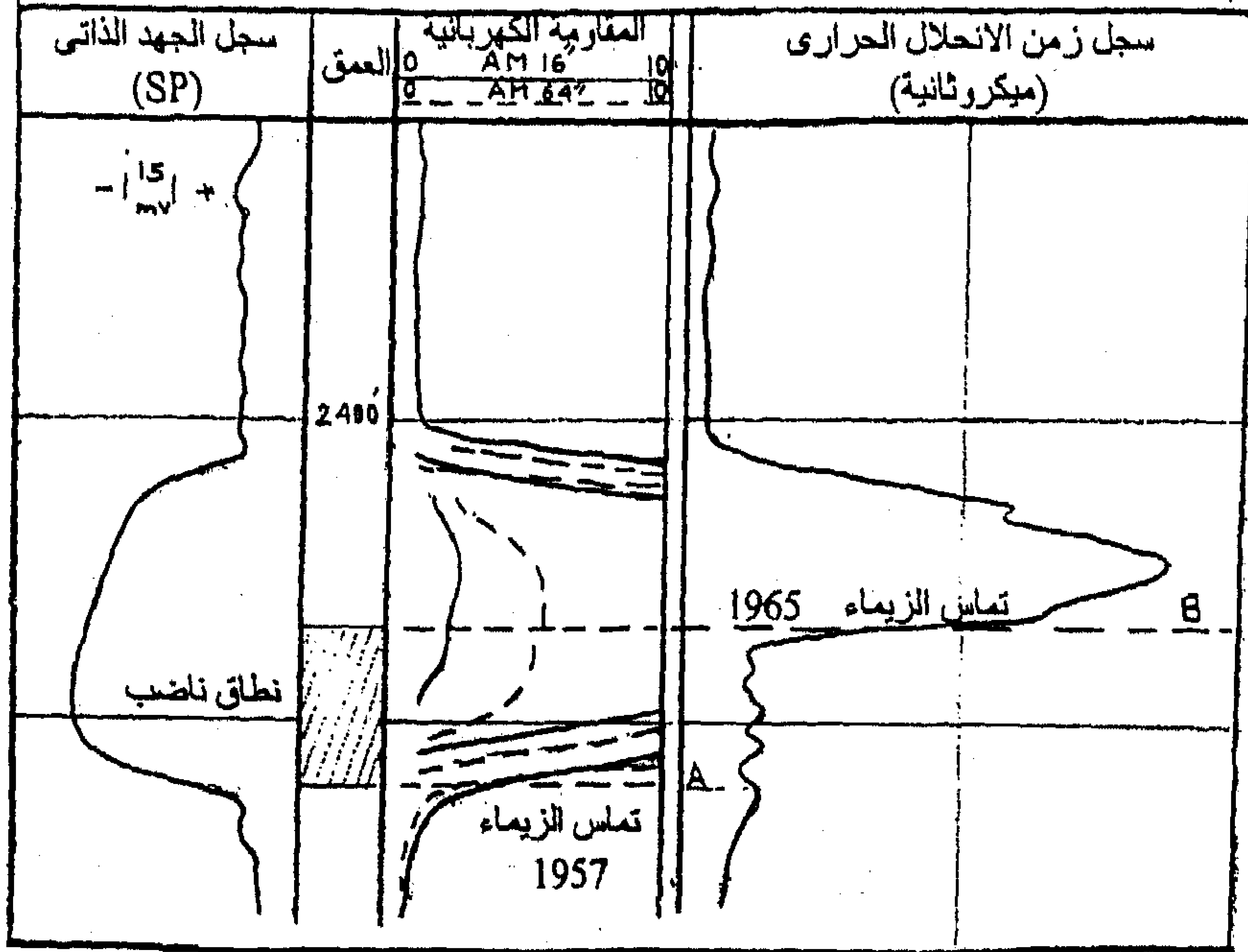
بجانب ما سبق من إجراء تسجيلات سلكية داخل الآبار قبل تغليفها (تبطينها) هناك عدد من التسجيلات التي أصبحت شبه روتينية داخل الآبار بعد تغليفها cased-hole logs بل وبعد انقضاء فترة زمنية من بدء الإنتاج ونظراً لأهمية هذه التسجيلات ففي النية تخصيص مؤلف بذاته لتناولها، وفيما يلي شرح للتسجيلات الشائعة الاستخدام.

سجلات الإشعاعية:

بعد أن يكون الخزان الجوفي قد أوشك على النضوب يتخذ القرار عادة إما بسد البئر وهجرها أو إعادة إكمالها، وفي الحالة الأخيرة يتطلب الأمر التعرف على الحالة الراهنة للخزان المنتج للزيت أو الغاز والموجود خلف القيسون، ويمكن أن يتم ذلك عن طريق كل من سجلي أشعة جاما والنيوترون، وهما من السجلات التي بالإمكان إجراؤها في الآبار المغلفة خاصة في الآبار المائلة حيث تعجز العديد من الأجهزة الأخرى في تقديم المعلومات المطلوبة تحت هذه الظروف. ويمكن من سجل جاما الحصول على معلومات مفيدة عن الخزان الجوفي ومحتواه الطفلي وكذا تحديد مواقع أطواق القيسون casing

collars، كما يمكن من بيانات سجل النيوترون خاصة النوع ذي النيوترونات النابضة pulsed neutrons التعرف على عدد من الخصائص البتروفيزيائية للخزان مثل المسامية والتشبع بالماء (أو الهيدروكربون) وتحديد تماسات الموائع داخل الخزان الجوفي.

ومن أنواع سجل النيوترون التي تجرى داخل الآبار الإنتاجية سجل زمن الانحلال الحراري thermal decay time log (TDT) حيث يدلى الجهاز داخل البئر وتنطلق منه نيوترونات عالية السرعة التي تصطدم بذرات العناصر المكونة للصخور مما يفقد هذه النيوترونات سرعتها ليتم في النهاية أسرها وامتصاصها وانبعاث أشعة جاما الأسرية، وتتأثر استجابة سجل TDT بعنصر الكلور المتواجد على هيئة كلوريد الصوديوم NaCl في الماء الطبقي حيث يعتبر الكلور من أقوى العناصر الأرضية الشائعة داخل الصخور المسامية وأقدرها على امتصاص النيوترونات وانطلاق أشعة جاما التي تتناسب شدتها مع الخصائص البتروفيزيائية للخزانات الجوفية، ويفيد سجل النيوترون كثيراً في تحديد تماس الزيهاء وكذلك مقدار التشبع بالماء وبالتالي التشبع بالهيدروكربون. وفيما يتعلق بالتماس المذكور فقد أصبح من المفيد إجراء تسجيل دوري للنيوترون داخل البئر (كل عام أو عامين) ومقارنة النتائج بمثيلاتها في ذات البئر قبل بدء إنتاجها أو في الأيام الأولى من الإنتاج والفرق بين القراءتين يوضح مدى تقدم التماس بل ويمكن أيضاً حساب المحتوى الهيدروكربوني ومقدار الإزاحة داخل الخزان المنتج ومدي اجتياح الماء الآتي من الخزان المائي الذي يقبع أسفل خزان الهيدروكربون، ويعرض الشكل ٢٤-٣ مثالاً لسجل النيوترون الانحلالي تم إجراؤه بعد ثماني سنوات من بدء الإنتاج من إحدى الآبار بالإضافة إلى تسجيلات المقاومة الكهربائية ومنحنى الجهد الذاتي والتي أجريت قبيل تغليف تلك البئر وإكمالها استعداداً لوضعها على خط الإنتاج، وفي حين تحدد سجلات المقاومة تماس الزيهاء عند عمق A مع بداية الإنتاج نجد أن هذا التماس قد تحدد بواسطة سجل النيوترون عند عمق B ليصل إلى منتصف الخزان المنتج مشيراً إلى تقدم جبهة الماء الطبقي خلال سنوات الإنتاج (شكل ٢٤-٣).



شكل ٢٤-٣: تقدم جبهة الماء الطبقي مع الإنتاج بناء على معطيات سجل المقاومة والنيوترون.

سجلات الإنتاج:

تستهدف سجلات الإنتاج production logs في المقام الأول تشخيص المشكلة الإنتاجية القائمة والتعرف على طبيعتها لإيجاد الحلول العلاجية لها، وقد يتم إجراء هذه التسجيلات بإدخال المسبار محمولاً على كبل كهربائي في أنبوب الإنتاج أو ربط المسبار بسلسلة أنابيب الإنتاج.

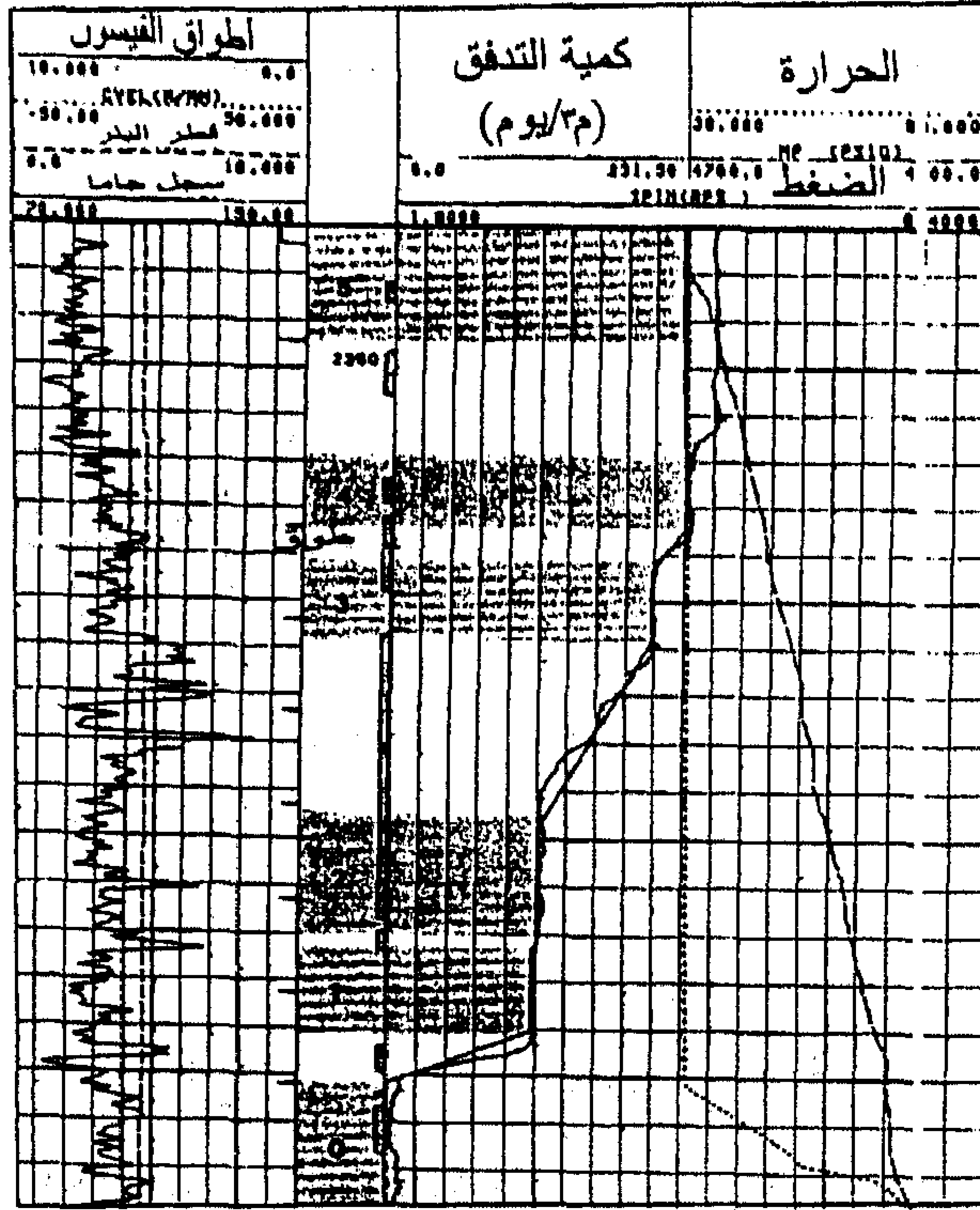
ومن أقدم هذه التسجيلات سجل المقتفيات tracer log والذي من بين تطبيقاته متابعة حركة الموائع داخل الخزان الجوفي باستخدام مقتف إشعاعي يتم حقنه داخل البئر عند موقع معين ثم متابعته في بئر مجاورة بواسطة مقياس لأشعة جاما، وبمعرفة الفارق في الزمن والمسافة بين البئرين يمكن التعرف على نفاذية ذلك الخزان، كذلك فإنه يمكن خلط هذا المقتفي بملاط الأسمنت ومن قياس مستوى الإشعاعية بعد ذلك يمكن التعرف على جودة وفاعلية عملية السمنتة خلف القيسون.

وهناك أيضاً **سجل الضوضاء noise log** والذي يستخدم جهاراً (ميكروفون) لكشف وتكبير الأصوات داخل البئر، ومن شأن ذلك تحديد من أين تتدفق الموائع هناك، وبمعرفة الترددات الصوتية يمكن التمييز بين السوائل والغازات.

أما سجل الحرارة temperature log فيقيس درجة حرارة الموائع بالبئر، وقبل بدء التسجيل يتم غلق البئر لفترة زمنية كافية تتيح اتزان درجة الحرارة، وعند تدفق الغاز إلى داخل البئر فإنه يتمدد ويؤدي ذلك إلى انخفاض ملحوظ في درجة الحرارة يقوم المسبار بتسجيله أمام الموقع المعين، ناهيك عن إمكانية سجل الحرارة في التعرف على جودة عملية السمنتة خلف القيسون كما أوضحنا من قبل (راجع شكل ١٩-٥).

كذلك هناك **جهاز التسجيل الإنتاجي PLT** المكون من عدة محاسيس منها محساس الضغط manometer الذي يقيس الضغط عند العمق، ومحساس تدرج الضغط gradiometer الذي يعطي بروفيلا متواصلاً لتدرج الضغط داخل البئر، وأيضاً محساس قطعية الماء watercutmeter الذي يحدد كمية الماء في الموائع التي تملأ البئر سواء أكانت بئراً إنتاجية أو بئراً للحقن، وتعتبر النتائج المستخلصة من هذا التسجيل ذات أهمية بالغة في مراقبة ومتابعة أداء الآبار والتعرف على طبيعة وسلوك الموائع داخل تلك الآبار، وعلى سبيل المثال يوضح الشكل ٢٤-٤ تفسيراً لإحدى آبار الحقن بالماء حيث تشير النتائج أن النُّطُق ٠ و١ و٢ تستحوذ على ٥٠٪ من إجمالي كميات المياه المحقونة بينما تتوزع باقي الكمية على مسافات التثقيب في النُّطُق ٣ و٤ و٥ الأمر الذي تؤيده نتائج التسجيلات للمحاسيس الأخرى.

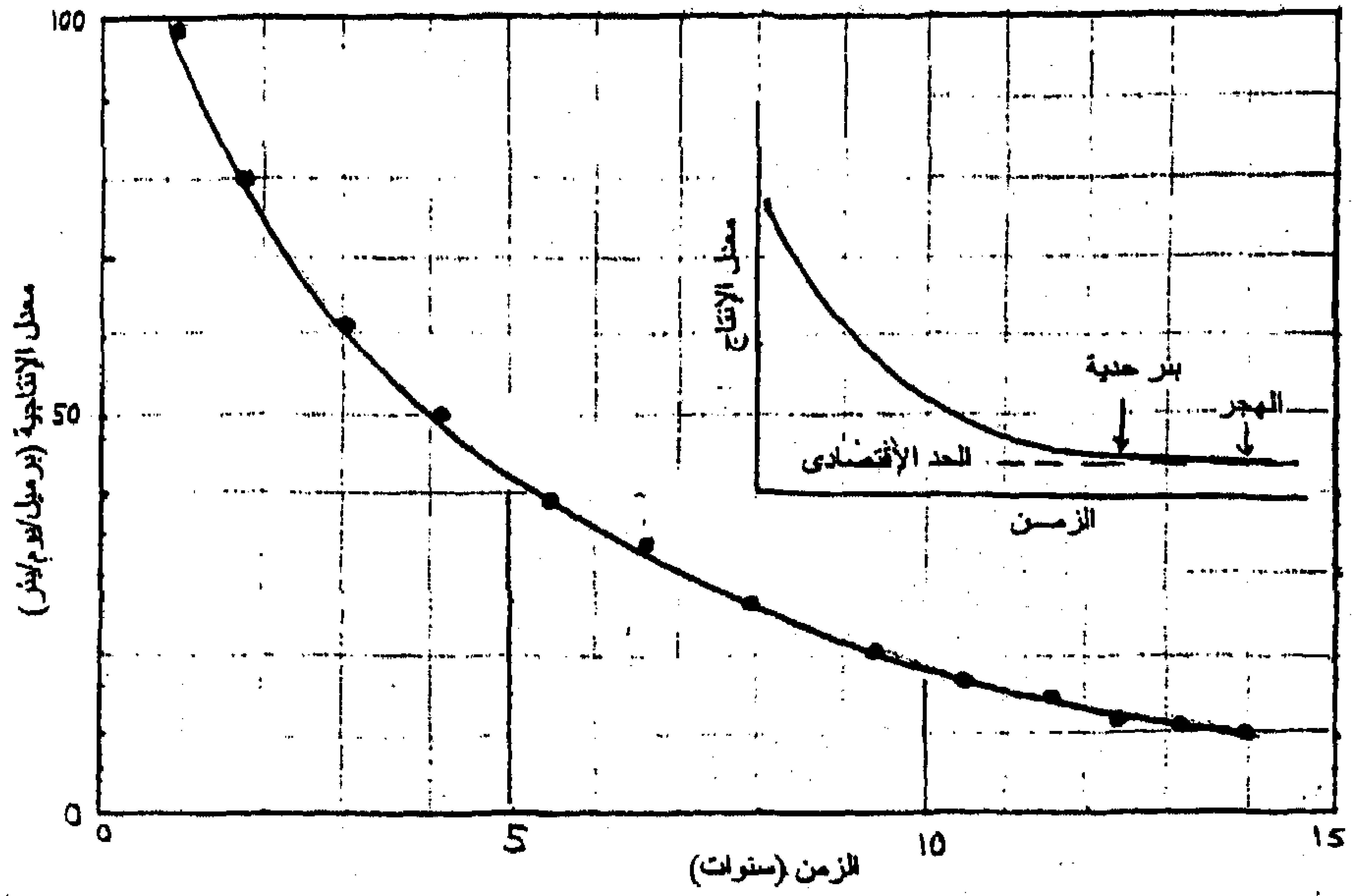
وإضافة إلى التسجيلات السابقة هناك مسبار تحديد أطواق القيسون في البئر ويوضح سجل الأطواق collar locator log (CCL) مواقع هذه الأطواق، وبالتالي إمكانية اختيار المسافات المطلوب تثقيبها وذلك بمساعدة سجل أشعة جاما والذي يجري متزامناً مع سجل الأطواق (راجع شكل ٢٤-٤).



شكل ٢٤-٤: تفسير لسجل الإنتاج في إحدى آبار الحقن بالماء.

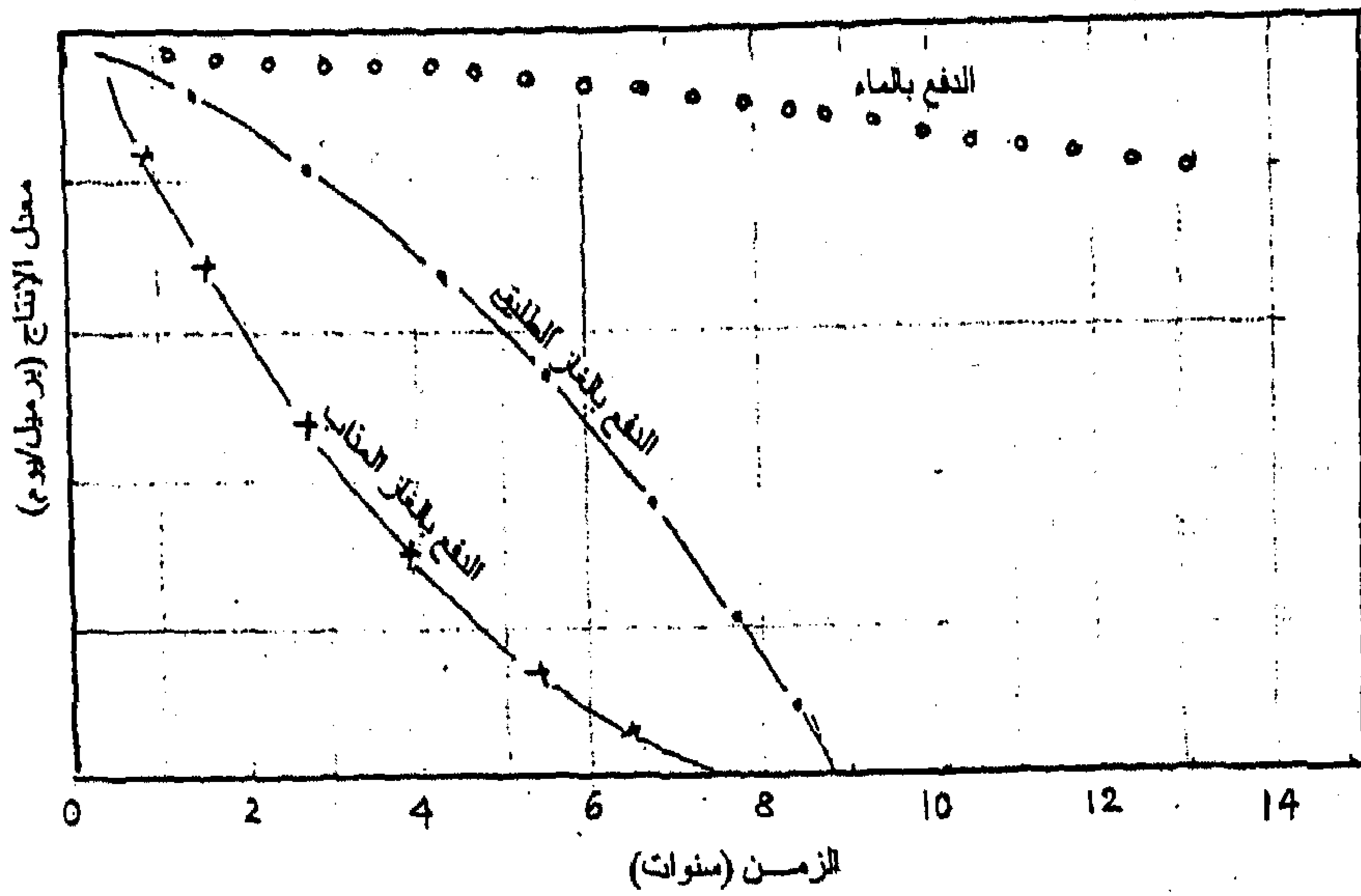
العمر الإنتاجي ومنحنى الهبوط:

لا يحتفظ الخزان المنتج للزيت أو الغاز بضغطه الأصلي حيث يلاحظ هبوط هذا الضغط مع انقضاء الوقت خلال العمر الإنتاجي للخزان وذلك حسب ما يعرف بمنحنى الهبوط decline curve والمبين بالشكل ٢٤-٥، ويعرف الضغط الأصلي أو الضغط الابتدائي للخزان initial reservoir pressure بأنه أعلى قيمة للضغط تم قياسها في الـ ٢٤ ساعة الأولى من بدء إنتاج البئر، إلا أنه مع استمرار إنتاج البئر يتدنى ضغط الخزان وكذا معدل الإنتاج ويستمر ذلك الوضع في التدهور لتصبح البئر في النهاية بئراً حدية الإنتاج stripper well ونادراً ما تكون اقتصادية، وتختلف الآبار الحدية في تصنيفها، ففي الولايات المتحدة مثلاً تكون البئر حدية إذا بلغ إنتاجها أقل من عشرة براميل من الزيت في اليوم أو أقل من ٦٠ ألف قدم مكعبة من الغاز في اليوم وربما كانت هذه الحدود أعلى من ذلك في مناطق أخرى من العالم، وتبين الإحصاءات أن حوالي ٤٥٪ من إجمالي آبار الزيت والغاز في العالم هي آبار حدية.

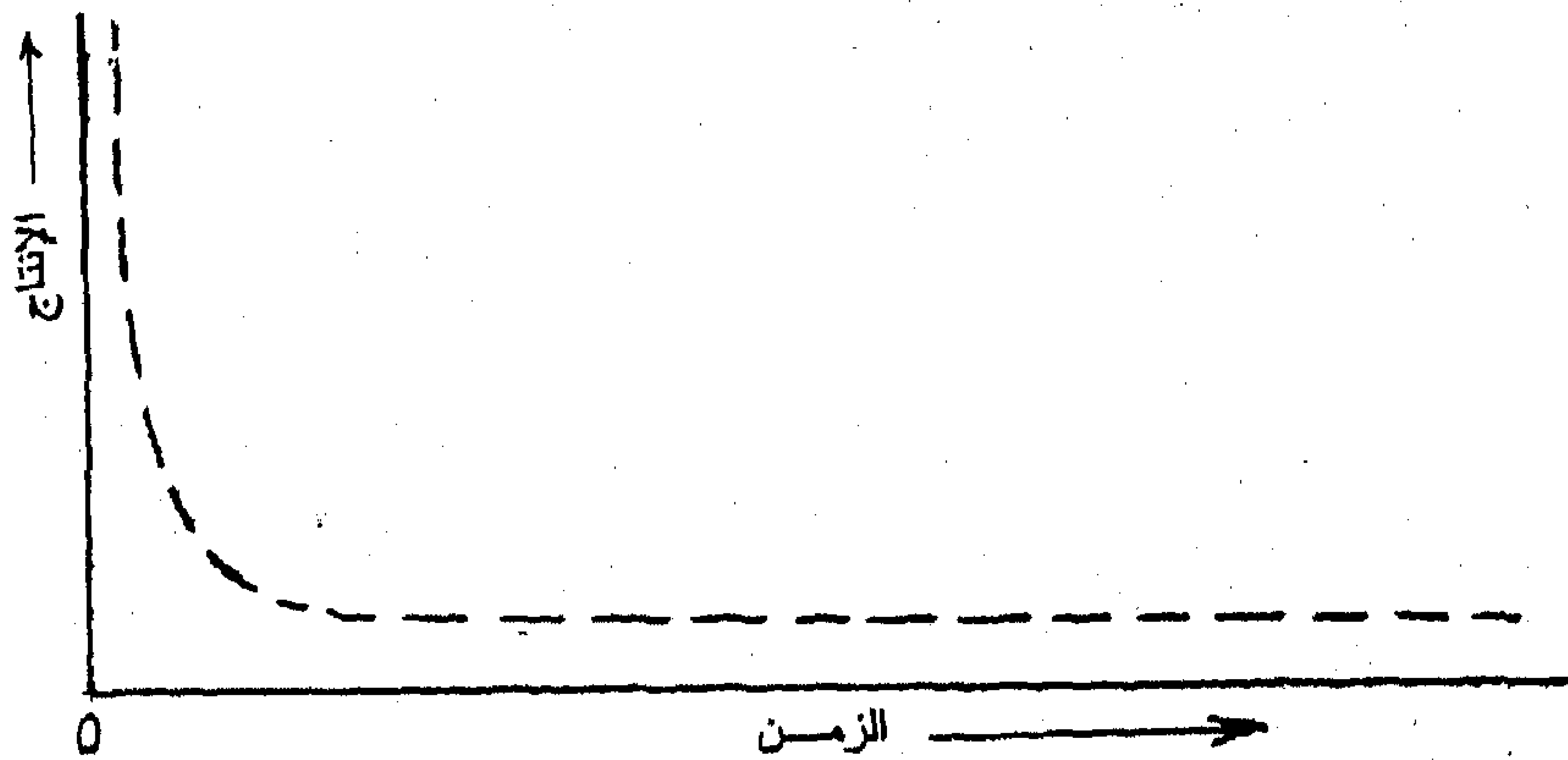


شكل ٢٤-٥: منحنى الهبوط والبئر الحدية.

ويطلق الحد الاقتصادى economic limit للبئر المنتجة عندما تتساوي التكلفة التشغيلية لهذه البئر مع العائد الاقتصادى منها، وهناك عدة عوامل تتحكم في هذا الأمر منها عمق البئر وموقعها وكمية المياه المنتجة، وإذا ما وصلت البئر إلى هذا الحد فإن الجهة المعنية تقوم بسدها وهجرها، أو أن تستعين بالطرق التعزيزية لرفع الإنتاج مثل الإغراق بالماء water flooding، وبالنسبة لمنحنى الهبوط فإنه يختلف في شكله تبعاً لآلية الدفع داخل الخزان، فالخزانات ذات الدفع بالغاز المذاب تكون منحنيات الهبوط بها ذات مسار حاد للغاية، بينما الخزانات ذات الدفع بالماء تتميز بإنتاجيتها الثابتة على المدى الطويل من عمرها الإنتاجي، أما منحنى الدفع بالغاز الطليق فتتخذ عادة شكلاً وسطاً بين ما هو في الدفع بالغاز المذاب والدفع بالماء (شكل ٢٤-٦). أما بالنسبة للخزانات المشققة مثل صخور الحجر الرملي المحكمة والحجر الجيري الكثيف فلها شكل مميز حيث يكون حاداً في الفترة الإنتاجية الأولى بسبب ارتفاع معدل الإنتاج الوارد من الشقوق ذات النفاذية الفائقة ليهبط المعدل بعد ذلك بشكل هائل وبصورة مستقرة على المدى الطويل حيث يكون تصريف الموائع من خلال الأجزاء ذات النفاذية الواطئة بعد أن كانت الأجزاء الأخرى من الخزان والتي تتمتع بنفاذيتها العالية هي المساهم الأول (شكل ٢٤-٧).



شكل ٢٤-٦: منحنيات الدفع داخل الخزانات الجوفية.



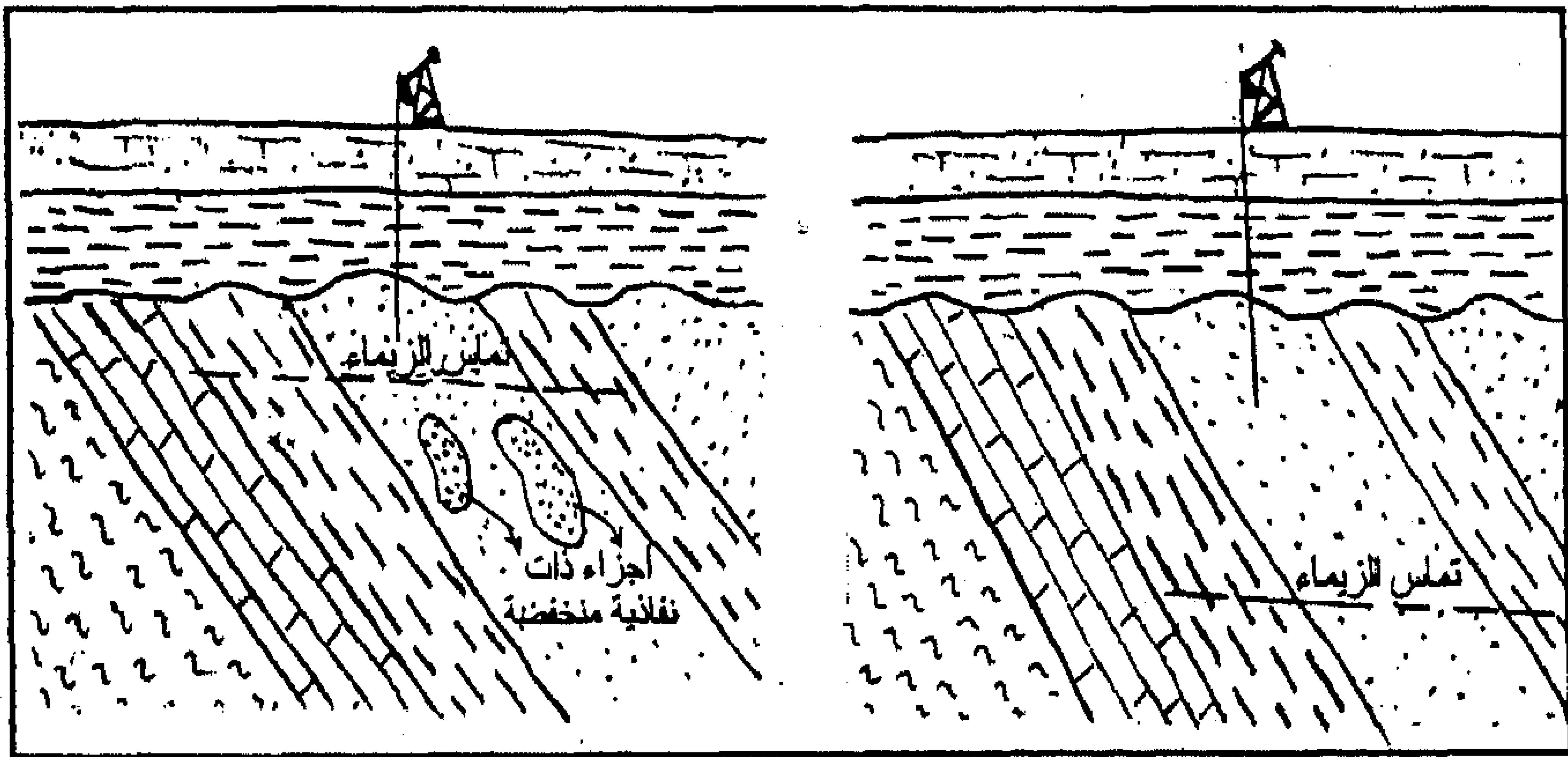
شكل ٢٤-٧: منحنى الهبوط في الخزانات المشققة.

بعض الظواهر الإنتاجية:

علمنا من قبل أن الغرض من حفر الآبار وإكمالها وإنتاجها هو تحقيق عائد اقتصادي منشود، ومن أفضل الطرق إلى ذلك أن يتم إنتاج الزيت أو الغاز على وجه السرعة الممكنة حتى يمكن استرجاع التكاليف السابقة والوصول إلى العائد المرجو، وفي أثناء عمليات الإنتاج قد تصادفنا بعض الظواهر التي ينبغي علينا دراستها والتعرف عليها والعمل على

تقليص فرص حدوثها، ومن بين تلك الظواهر ما يعرف بالتجاوز والتمخرط، وفيما يلي شرح لكل من هاتين الظاهرتين.

- **التجاوز bypassing**: وتحدث هذه الظاهرة بسبب عدم تجانس الغالبية من الخزانات الجوفية في خصائصها البتروفيزيائية مما يؤدي إلى تواجد جيوب للزيت أو الغاز في الأجزاء من الصخر الخزاني ذات النفاذية الواطئة نسبياً، وإذا كان الدفع بالماء على سبيل المثال هو السائد في الخزان الجوفي فإن الماء سوف يعمل على دفع الزيت والغاز أثناء الإنتاج ويحل محلهما داخل المسام الصخرية، وإذا كان إنتاج الزيت والغاز أسرع من اللازم فإن الماء سوف يتدفق حول جيوب الزيت والغاز الموجودة في الأجزاء الأقل نفاذية في ظاهرة تسمى التجاوز كما هو موضح بالشكل ٢٤-٨، ومن شأن هذا التجاوز أن يعمل على عزل الزيت والغاز في تلك الأجزاء ومنعهما من التدفق إلى البئر، ولكي نتدارك هذا الأمر ونحقق أكبر قدر من الإنتاج يتطلب الأمر حينئذ تخفيض معدل الإنتاج حتى تتاح للمناطق المتجاوزة أن تسهم بفاعلية أكبر في تصريف ما بداخلها من هيدروكربونات، وربما دعت الحاجة إلى حفر آبار جديدة بتلك المناطق إن كانت الاحتياطيات البترولية بها تبرر ذلك.

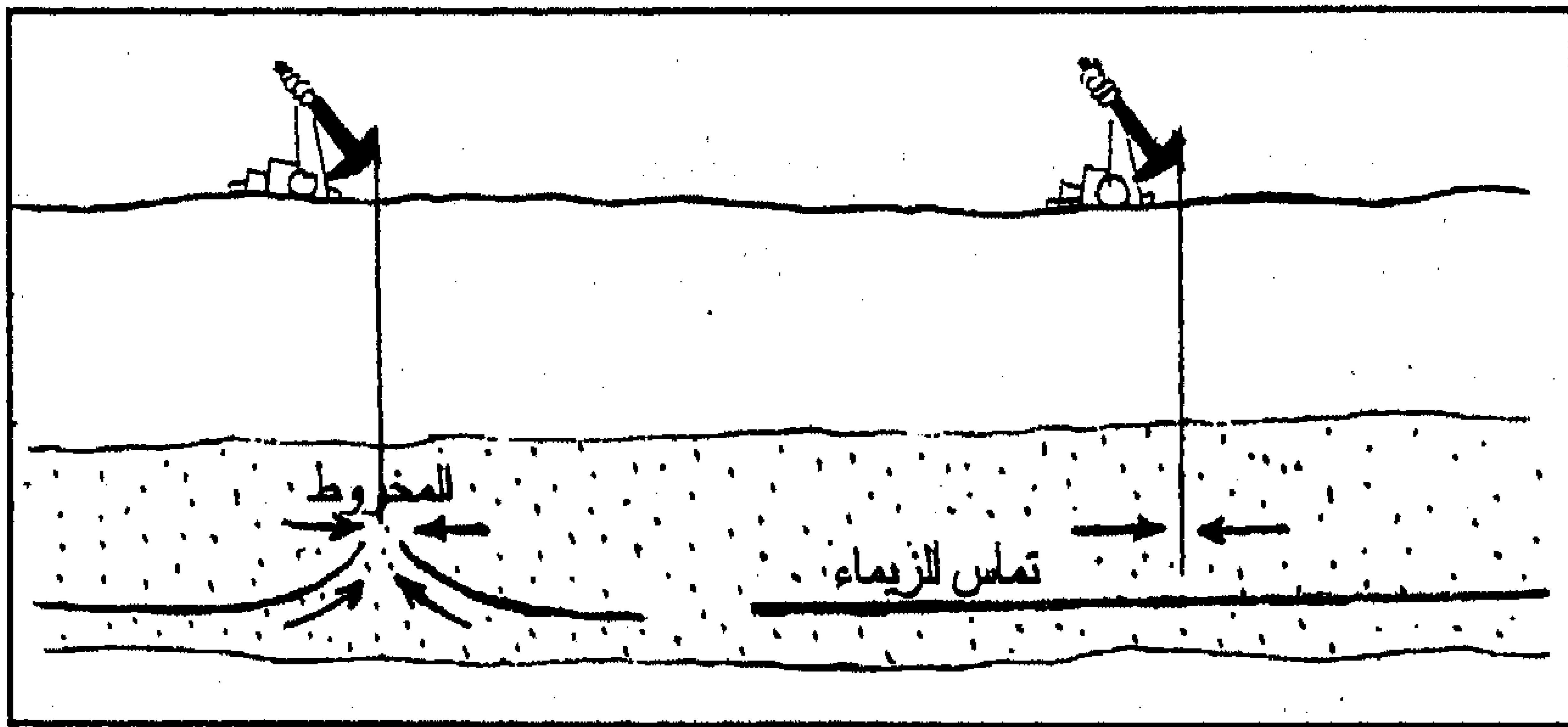


شكل ٢٤-٨: ظاهرة التجاوز وجيوب الزيت والغاز المحتجزة داخل الخزان المنتج.

- **التمخرط (التكوّز) coning**: وهي ظاهرة تنشأ عنها مخاريط cones داخل الخزان المنتج والسبب في ذلك هي عمليات الإنتاج السريعة والمفرطة، وفي حالة الدفع بالماء يحدث مص أو شد لتماس الزيماء إلى أسفل مكوناً بذلك الشكل المخروطي،

أما في حالة الدفع بالغاز الطليق يكون مص تماس الزيغاز إلى أعلى، وفي كلتا الحالتين قد تسبب هذه الظاهرة أذى أو ضرراً بالغاً للخزان الجوفي ويؤثر ذلك في المقام الأول على إنتاجية الخزان من الزيت والغاز (شكل ٢٤-٩).

ويتوقف ارتفاع واتساع رقعة المخاريط الناجمة على خصائص الموائع والخزانات الجوفية ومعدلات الإنتاج القائمة، وفي الخزانات ذات الخصائص الجيدة وذات المعدلات العالية (مثلاً ٢٠ ألف برميل في اليوم) ربما وصل ارتفاع المخروط إلى أكثر من ٦٠ متراً (٢٠٠ قدم) وامتداده داخل الخزان لعدة مئات من الأمتار، وواضح أن هذا الحجم غير مرغوب خاصة في الحالات التي يكون فيها عمود الزيت محدوداً مما سوف يسمح بتدفق كميات كبيرة من الماء إلى داخل البئر أثناء عملية الإنتاج حتى وإن كانت معدلات الإنتاج منخفضة نسبياً، وفي مثل هذه الحالات ينصح بحفر آبار أفقية لتجنب الآثار السلبية لتلك المخروطات.



شكل ٢٤-٩: ظاهرة التمخرط نتيجة السحب المفرط للخام.

تدوير الغاز:

يحدث أحياناً في الخزانات المنتجة للغاز عند تدهور الضغط بها وعلى الأخص في حالة الخزانات ذات التكثيف الرجعي retrograde condensation أن تنفصل المتكثفات عن الغاز الأصلي وتغطي هذه السوائل سطوح المسام مما يجعل من الصعب أو حتى استحالة استخلاصها، ولمنع هذه المتكثفات من الانفصال يمكن أن يتم ذلك عن طريق التدوير cycling حيث يتم فصل السوائل الغازية على السطح ثم إعادة حقن الغاز الجاف في الآبار إلى داخل الخزان للمحافظة على ضغطه.

تنشيط الآبار:

قد تحتاج الآبار في مرحلة من مراحل إنتاجها إلى تنشيط أدائها well stimulation بهدف رفع كفاءة الطبقات المنتجة، ولتحقيق هذا الغرض هناك عدة طرائق يمكن استخدامها وتشمل المعالجة بالحامض والتكسير التفجيري والتكسير الهيدروليكي، وفيما يلي شرح لكل طريقة على حدة.

- **المعالجة بالحامض:**

وهي عملية قديمة تستهدف بصورة رئيسة الخزانات الجيرية مثل الحجر الجيري والدولوميت ومعالجتها بالحامض acidising، كما يمكن استخدامها أيضاً في الخزانات التي تتشكل فيها المادة اللاحمة للحبيبات الصخرية من مواد كلسية تستجيب للأحماض، وقد يستخدم حامض الهيدروكلوريك HCl بمفرده أو ممزوجاً وحامض الهيدروفلوريك HF لزيادة الفاعلية، أما في حالة الحجر الرملي فيستخدم حامض الهيدروفلوريك، أما في التكوينات ذات درجات الحرارة المرتفعة فيمكن استعمال حامض الخليك مع حامض الفورميك، ولتجنب تآكل أنابيب التغليف والإنتاج المصنوعة من الصلب تضاف إلى الحامض المستخدم مواد تعمل كمانعات للتآكل inhibitors، كما تضاف أيضاً مواد من شأنها حجز الأيونات بالاتحاد معها في مركبات ذوابة وتعرف هذه المواد بمُنحّيات الأيونات sequestering agents حيث يمنع ذلك تكون الغروانيات ورواسب الحديد التي تتسبب في سد المسام الصخرية أثناء عملية التنشيط.

وهناك طريقتان في المعالجة بالحامض، وتستهدف الطريقة الأولى المادة الهيكلية matrix للحبيبات الصخرية وإذابتها بالحامض وهي ما تسمى بعملية المعالجة للمادة الهيكلية matrix acidising، أما الطريقة الثانية فهي تستهدف تكسير وإذابة وتوسيع المسام الصخرية للطبقة المنتجة وذلك بدفع الحامض إلى داخل البئر تحت ضغط عال وهي ما تسمى طريقة المعالجة بالتكسير fracture acidising.

وفي بعض الأحيان قد يتطلب الأمر مجرد غسل الطبقة المنتجة بالحامض wash job بسبب ما أصابها من أذى أو ضرر في وقت سابق، وقد ينشأ الضرر نتيجة لغزو المكونات الصلبة من طين الحفر (أو أثناء سمنتة القيسون) إلى داخل الخزان حيث تعمل هذه

المكونات على سد الفراغات البينية معرقلة بذلك تدفق الزيت أو الغاز إلى البئر وحيث يعتري الخزان انخفاض غير مرغوب في ضغطه، ولمعالجة ذلك الأمر فإنه يمكن ضخ الحامض مباشرة في أنبوب الإنتاج أو باستخدام الأنبوب الملفوف ضماناً لوضع الحامض في المكان المناسب ودون الحاجة إلى قتل البئر.

وبعد الانتهاء من عملية المعالجة يتم التخلص من الحامض المستهلك وكذا الفتات الصخري والرواسب بالضخ إلى خارج البئر فيما يعرف بإعادة التنظيف back flushing.

- **التكسير بالتفجير:**

حتى أواسط القرن الماضي كان أسلوب التكسير بالمتفجرات explosive fracturing أمراً شائعاً في تنشيط الآبار حيث تتسبب عملية التفجير في تكسير الطبقة المنتجة وإحداث مجار وممرات لتدفق الموائع خلالها إلى داخل البئر، وقد كان يتم بواسطة مادة النيتروجلسرين nitroglycerin السائلة ذات الفاعلية العالية ثم يعقب ذلك تنظيف البئر وإكمالها دون تغليفها، وبالطبع فقد كان لهذا الأسلوب مزاياه في تنشيط الآبار لكنه لم يكن محمود المخاطر.

- **التكسير الهيدروليكي:**

يعتبر التكسير الهيدروليكي hydraulic fracturing تقنية حديثة تم إدخالها إلى الصناعة بهدف الاستغناء عن التكسير بالتفجير ذي المخاطر الكبيرة، وتسمى هذه التقنية بعملية التكسير frac job وتقوم بإنجازها شركات متخصصة في هذا الشأن حيث يتم حقن كميات ضخمة من مائع التكسير تحت ضغط عال داخل البئر مما يعمل على تكسير الصخر الخزان، ويمكن إجراء هذه العملية في الآبار غير المغلفة أو المغلفة على حد سواء.

ومائع التكسير الشائع عبارة عن مادة هُلامية (جِلْ) مكون من مزيج من الماء والبوليمرات polymers وهي جزئيات عضوية ذات سلسلة طويلة ويمكن لها أن تكوّن – عند خلطها بالماء– سائلاً غليظ القوام، وتجنباً لحدوث ضرر للخزان الجوفي تستخدم عادة موائع للتكسير ذات قاعدة زيتية أو قاعدة رغوية foam-based باستعمال غاز النيتروجين أو ثاني أكسيد الكربون، ونظراً لضخامة كمية الموائع المستخدمة يتم نقلها في شاحنات كبيرة إلى موقع العمل.

وتتضمن عملية التكسير ثلاث مراحل حيث تبدأ المرحلة الأولى بحقن مائع التكسير إلى داخل البئر باستخدام وحدات ضخ كبيرة تحمل على شاحنات تمهيداً لتكسير الصخر المعني، وتركز المرحلة الثانية على ضخ ملاط التكسير مضافاً إليه مواد داعمة propping agents or proppants إلى داخل البئر وذلك لإحداث التكسيرات المطلوبة وتوسيع الشقوق الناتجة وملئها بتلك المواد الداعمة والتي تعمل على الحيلولة دون انسداد الشقوق التي أحدثتها العملية لتشكل مجار لتدفق الهيدروكربون إلى البئر المنتجة، وتتكون المواد الداعمة من كريات صغيرة من حبات الرمل أو الزجاج أو الألومنيوم أو السيراميك حيث أن وجود هذه المواد يحافظ على إبقاء الشقوق المستحدثة مفتوحة لانسياب الخام خلالها مما يزيد من سرعة الإنتاج وتنشيط البئر. أما المرحلة الأخيرة فتتركز على إزالة سائل التكسير والتخلص من أية شوائب عالقة بداخل البئر وتعرف هذه العملية بإعادة التنظيف.

وفي العادة يتم إجراء عملية التكسير الهيدروليكي في التكوينات الجيولوجية الصلبة والمتوسطة الصلابة، أما في التكوينات الرخوة وغير المتماسكة فلا تتاح الفرصة للمواد الداعمة أن تقوم بدورها في المحافظة على إبقاء الشقوق المستحدثة مفتوحة لكي تعمل كمجار لتدفق السوائل خلالها.

وتوصف عملية التكسير الهيدروليكي بحسب كميات الموائع والمواد الداعمة المستخدمة، وفي عملية مثالية يمكن استخدام ٤٣ ألف جالون (١٦٢٧٥٥ لتراً) من مائع التكسير و٦٨ ألف رطل (٣٠٨٠٠ كيلوجرام) من المادة الداعمة، ولكن قد تستخدم في عمليات تكسير كميات ضخمة من المائع لأكثر من مليون جالون (حوالي ٤ مليون لتر) و٣ ملايين رطل (١٫٤ مليون كيلوجرام) من المادة الداعمة.

ويعتبر التكسير الهيدروليكي من أكثر طرق تنشيط الآبار استخداماً نظراً لنتائجه الفعالة في زيادة معدل الإنتاج وتعظيم الاحتياطيات القابلة للاستخراج فربما وصلت تلك الزيادة إلى ما بين ١٫٥ و٣٠ ضعفاً مقارنة بالمعدل الأصلي للإنتاج، أما بالنسبة للإنتاج الأقصى فقد يرتفع من ٥ إلى ١٥٪. ومن المشاهد حالياً أن عدداً كبيراً من الشركات العاملة قد أقبلت على استخدام التكسير الهيدروليكي بالرغم من التكلفة العالية نسبياً، بل لقد تخطى نشاطها إلى خزانات الحجر الرملي بعد أن كانت العمليات قاصرة في أغلبها على

الخزانات الجيرية، كما نجد أن بلداً مثل الولايات المتحدة قد أجرت هذا النوع من التكسير في ما يقرب من ٥٠٪ من آبار الغاز هناك وحوالي ٣٠٪ من الآبار المنتجة للزيت دون النظر إلى ارتفاع التكلفة حيث أمكن تعويض ذلك من خلال العائد الإنتاجي.

ولا يقتصر التكسير الهيدروليكي في البئر الواحدة على مرة واحدة طوال العمر الإنتاجي للبئر، فقد يستدعي الأمر تكرار هذا العمل لذات البئر، وفي جميع الأحوال ينبغي الحذر من إحداث شقوق قد تمتد لتصل إلى أجزاء من الخزان المائي أسفل التكوين المنتج للزيت أو الغاز مما قد يتسبب في غمر البئر بالماء المتدفق على حساب الخام المطلوب.

مشكلات بيئية وظواهر حقلية:

لا تسير عملية الإنتاج بشكل هادئ ودون تداعيات، ففي خلال فترة الإنتاج والتي قد تستمر إلى عقد أو عقدين من الزمان تبرز على السطح مشكلات بيئية وظواهر حقلية تتطلب معالجتها بصورة آمنة وناجحة، وقد اخترنا عدداً منها بهدف إلقاء الضوء عليها وكأمثلة لا ينبغي إغفالها.

- **الغاز المذاب:**

يأتي الغاز المصاحب للزيت المنتج من فواصل الفرز بعد أن يكون ضغطه قد وصل إلى الضغط الجوي تقريباً، ونظراً لأن هذا الغاز لم تكن له فائدة اقتصادية كبيرة فإنه يتم حرقه على هيئة شعلات مضيئة تتجلى رؤيتها وعلى الأخص ليلاً في مناطق حقول البترول المنتجة والمنتشرة هنا وهناك، وبعد صدور التشريعات البيئية المختلفة وتقليص حرق الغاز بسبب آثاره البيئية السلبية والانبعاثات الضارة رؤي تكثيف الجهود نحو الاستفادة من هذا الغاز في تعظيم إنتاجية الآبار، وذلك بإعادة حقن الغاز داخل الخزان الجوفي مما يساعد في الحفاظ على ضغط الخزان ورفع كفاءته الإنتاجية، وقبل حقن الغاز تنزع منه السوائل الغازية ذات القيمة الاقتصادية حيث يتم ضغطه وحقنه داخل آبار الحقن injection wells، وبالنسبة للخزانات البترولية المشبعة يتم حقن الغاز داخل حيز الغاز الطليق أعلى الزيت، أما في الخزانات تحت المشبعة يجري الحقن داخل نطاق الزيت، وفي جميع الأحوال فإن من شأن عملية الحقن أن ترفع من آلية الدفع داخل الخزان ومن ثم زيادة إنتاجية الآبار، وبالإضافة إلى حقن الغاز يمكن أيضاً استغلال بعض الغاز في

تشغيل التجهيزات المقامة بالحقل مثل المحركات والآلات التي تدير الوحدات المختلفة كمضخات السحب والرفع وغيرها.

- **الماء المنتج:**

وهي كميات المياه التي تم فصلها من الخام المنتج والتي تكون عادة مالحة أو شديدة الملوحة، وبدلاً من التخلص منها بطريقة قد تضر بالبيئة فإنه يمكن ضخها من جديد داخل بئر الحقن في الخزان المنتج عند موقع أسفل تماس الزيماء مما يساعد على رفع كفاءة آلية الدفع داخل الخزان وبالتالي في زيادة الإنتاجية، وإذا لم تكن هناك حاجة إلى هذه المياه فإنه يمكن ضخها في خزانات جوفية أخرى بشرط ألا تكون هذه الخزانات حاملة لمياه عذبة قد يجري استخدامها في أغراض الشرب أو الري، كذلك يجب أن تكون الخزانات المقترحة قادرة على استيعاب ضغوط الماء المضخ، وإلا أدى ذلك إلى احتمال تسرب هذا الماء إلى خزانات أخرى قريبة حاملة للمياه العذبة والتي قد تتعرض إلى التلوث بسبب ذلك وتفقد قيمتها الاقتصادية.

وفي حالة عدم وجود آبار للتخلص disposal wells من هذه المياه فإنه يمكن تخزينها والاحتفاظ بها في مستودعات خاصة لحين التصرف فيها دون إحداث أضرار بيئية أو تعريضها للجو مباشرة حتى تتبخر مع الوقت.

- **الهبوط الأرضي:**

أثناء الإنتاج ينخفض ضغط الخزان المنتج وعادة ما ينساب الماء الجوفي داخل المسام الصخرية ليحل محل الموائع المستخرجة، وإذا لم يحدث ذلك فإن الخزان الجوفي سوف ينضغط مما يؤدي إلى هبوط أرضي surface subsidence، وقد حدثت هذه الظاهرة في عدد من المناطق في العالم، ولعل منطقة حقل ولمنجتون Wilmington للبترول في كاليفورنيا خير مثال للتدليل على ذلك، فقد بدأ إنتاج الزيت من هذا الحقل منذ ثلاثينيات القرن الماضي وبدءاً من العقد التالي للإنتاج لوحظ هبوط أرضي بالمنطقة واستمر هذا الهبوط ليصل مؤخراً إلى ما يقرب من تسعة أمتار (٢٩ قدماً) في مركزه، متسبباً في أن يصبح جزء كبير من المنطقة تحت سطح البحر، ولوقف استمرار حالة الهبوط والتغلب على هذه الظاهرة تم وضع برنامج فعال عن طريق حقن الماء داخل التكوين الجيولوجي

كانت له آثاره البيئية الجيدة في صون المنطقة من الهبوط وكذلك بإقامة حواجز مرتفعة لحمايتها من التقدم المحتمل لمياه البحر.

وثمة مثال آخر للهبوط الأرضي في حقول البترول وهو ما حدث في حقل اكوفيسك Ekofisk في منطقة بحر الشمال حيث لوحظ للمرة الأولى هبوط أدى إلى انهيار أنابيب القيسون في العديد من الآبار مما أدى إلى غوص المنصة البحرية إلى أسفل وهبوطها إلى عمق خطير، إلا أنه قد أمكن إصلاح المنصة وإعادة إقامتها إلى ارتفاع آمن خلال ثلاث سنوات من اكتشاف الهبوط.

- **التآكل:**

يعرف التآكل corrosion بأنه انحلال كيميائي للمعادن وهو مشكلة تتعرض لها المكونات المعدنية لمعدات وتجهيزات الحفر والإنتاج في حقول البترول، ويحدث التآكل عند تعرض المعدن إلى الهواء والرطوبة أو ماء البحر أو إلى عوامل أخرى مثل الأكسجين، وثاني أكسيد الكربون (تآكل حلو sweet corrosion) أو كبريتيد الهيدروجين (تآكل حامضي sour corrosion) في المواقع المنتجة، ولحماية الأسطح المعدنية المعرضة للجو من التآكل فإنه يجري طلاؤها بين الحين والحين، كما أن هناك مواداً كيميائية مانعة للتآكل ويتم حقنها داخل الآبار وفي تسهيلات الإنتاج المختلفة والمصنوعة من المعدن حيث تعمل هذه المواد كأغطية رقيقة وعازلة من التآكل، وفي أغلب الأحيان يتم حماية أنبوب الإنتاج بتبطينه بالبلاستيك، أما بالنسبة للمكونات الضخمة كخطوط الأنابيب والهياكل البحرية فيمكن حمايتها بواسطة ما يعرف بالحماية المهبطية cathodic protection حيث يتم تزويد هذه الهياكل بشحنات كهربائية لمنع التآكل.

الفصل الخامس والعشرون

الاحتياطيات البترولية

بعد أن تحدثنا في الفصول السابقة عن أنشطة الاستكشاف والإنتاج للتجمعات البترولية علينا الآن أن نعرض لكيفية تقدير المخزونات من الزيت الخام والغاز الطبيعي وحتى يمكن لنا ترجمة هذه المخزونات إلى أرقام نقدية وأصول نمتلكها، وحسب آخر الإحصاءات يمتلك العالم احتياطيات مؤكدة من البترول تقدر بـ ١٢٥٨ بليون برميل من الزيت منها ٧٥٤ بليون برميل (٦٠٪) في الشرق الأوسط و٧١ بليون برميل (٦٪) في الولايات المتحدة، وبالنسبة للغاز الطبيعي هناك احتياطيات عالمية تقدر بـ ٦٥٣٤ تريليون قدم مكعبة منها ٢٦٨٠ تريليون قدم مكعبة (٤١٪) في الشرق الأوسط و٣١٣ تريليون قدم مكعبة (٤.٨٪) في الولايات المتحدة. والواقع أن هذه الأرقام هي أرقام ديناميكية قابلة للتغير من وقت لآخر ويتحكم فيها مدى صحة المعلومات الواردة ودرجة وثوقيتها وما قد يستجد من إضافات تتعلق باكتشاف حقول بترولية جديدة أو تدهور في معدلات الإنتاج والاستهلاك وسوف نتطرق إلى ذلك فيما بعد.

المخزون الأصلي والاحتياطي من الهيدروكربون:

هذان مصطلحان أساسيان لكي نفهم كم لدينا من ثروة بترولية في منطقة ما سواء كانت تتعلق بالزيت الخام أو الغاز الطبيعي، فالمخزون الأصلي من الزيت oil in place هو تلك الكمية الموجودة من الزيت في باطن الأرض مقدرة بالبرميلbarrel، أما المخزون الأصلي من الغاز gas in place فهو تلك الكمية من الغاز الطبيعي الموجودة في باطن الأرض مقدرة بالقدم المكعبة أو المتر المكعب، والحقيقة أن هذه الكميات لا يمكن استخراجها من الخزان الجوفي برمتها ولكن بعضاً منها هو ما يمكن استخراجه فعلياً تبعاً لما يعرف بعامل الاستخلاص (الاسترداد) recovery factor، وهو عامل تتوقف قيمته على لزوجة الزيت ونفاذية الخزان الجوفي وآلية الدفع داخل الخزان، وهذه الأخيرة تعتبر العامل المؤثر في هذا الشأن كما سنلاحظ من المقارنات التالية.

جدول ٢٥-١ : آلية الدفع وعامل الاستخلاص في خزانات الزيت والغاز الطبيعي.

الخزان الجوفي	آلية الدفع	عامل الاستخلاص (٪)
خزانات الزيت	الغاز الذائب	٥-٣٠
	الغاز الطليق	٢٠-٤٠
	الدفع بالماء	٣٥-٧٥
	التصريف بالجاذبية	٥٠-٧٠
خزانات الغاز	تمدد الغاز	٧٥-٨٥
	الدفع بالماء	٦٠

وبناء على هذه البيانات فإنه بالنسبة للخزانات الحاملة للزيت تكون قيمة عامل الاستخلاص هي الأعلى في حالتي الدفع بالماء والتصريف بالجاذبية، وبالنسبة للخزانات الحاملة للغاز يكون عامل الاستخلاص هو الأعلى في حالة آلية الدفع عن طريق تمدد الغاز مقارنة بالدفع بالماء.

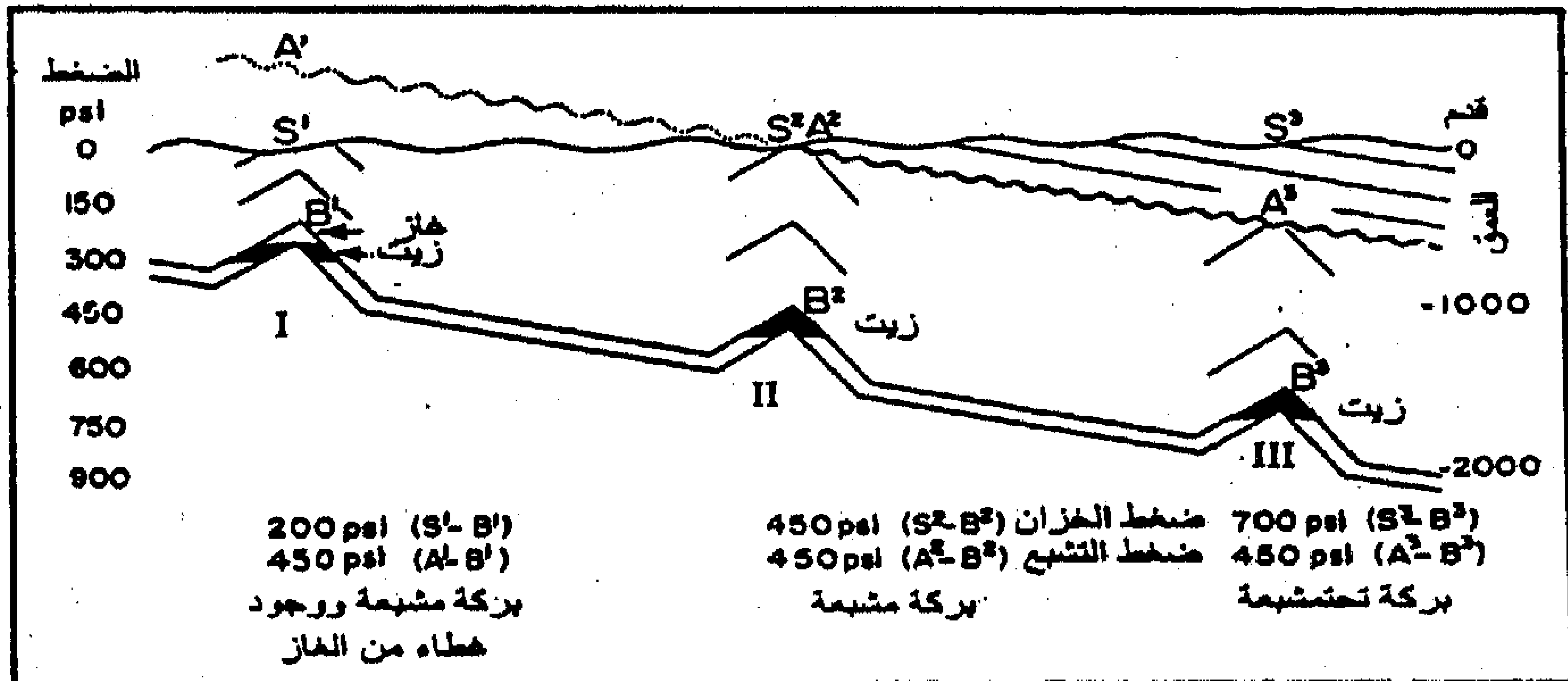
ويطلق مصطلح الاحتياطي البترولي petroleum reserve على المخزون الأصلي من الزيت أو الغاز الذي يمكن استخلاصه من الخزان الجوفي سواء كان ذلك بوسيلة طبيعية أو اصطناعية وهو ما سوف نتناوله بالشرح وما سوف نراه من أسباب في هذا الشأن وماذا يحدث من سلوك للهيدروكربونات الموجودة في باطن الأرض وحتى تصل كمياتها إلى السطح.

عامل الانكماش والعامل الحجمي:

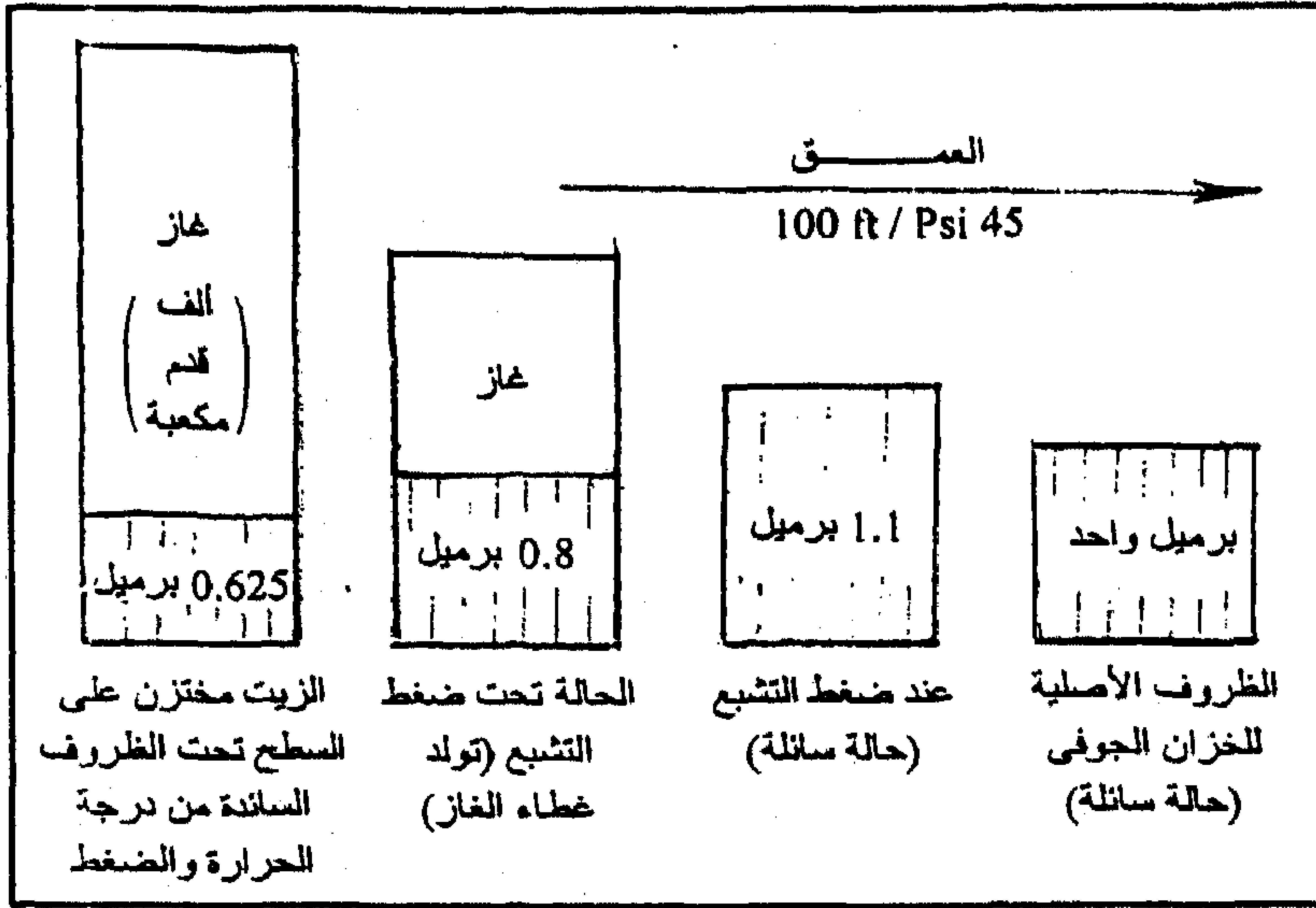
تعرف كمية الزيت الذائب في الزيت الخام داخل البركة أو الخزان الجوفي بأنها نسبة الغاز الذائب إلى الزيت dissolved gas-oil ratio مقدرة بالقدم المكعبة القياسية في البرميل الواحد من الزيت (scf/bbl) وهي نسبة تتوقف على درجة حرارة وضغط الخزان بالإضافة إلى كيميائية الزيت، وبصورة عامة فإن كانت الخزانات الجوفية موجودة عند أعماق كبيرة ازدادت نسبة الغاز الذائب إلى الزيت، وإذا ما أمكن للزيت إذابة كل الغاز الموجود داخل الخزان يقال لهذا الخزان أنه أصبح مشبعاً وبالتالي فإن خزان الزيت الذي يحتوي على غطاء من الغاز الطليق هو خزان مشبع saturated، وإذا لم يوجد هذا الغطاء من الغاز فربما كان الخزان قد وصل إلى درجة التشبع ولكن من الأكثر احتمالاً أن يكون الخزان لا يزال تحت التشبع undersaturated ويمكن استيعاب المزيد من الغاز داخله

(شكل ٢٥-١). وعندما يبدأ الانتاج من الخزان الجوفي فإن درجة حرارته وضغطه يشرعان في الانخفاض، وعندما يتدفق الزيت إلى السطح يكونان قد وصلا إلى درجة الحرارة والضغط السطحيين وينطلق الغاز المذاب من الزيت، وتسمى كمية الغاز المنتج إلى الزيت عند السطح بنسبة الغاز إلى الزيت المنتج producing gas-oil ratio، وهي شبيهة بنسبة الغاز الذائب إلى الزيت داخل الخزان، ولكنها قد تكون أكبر منها إذا ما كان هناك مدد من الغاز قادم من غطاء الغاز الطليق free gas.

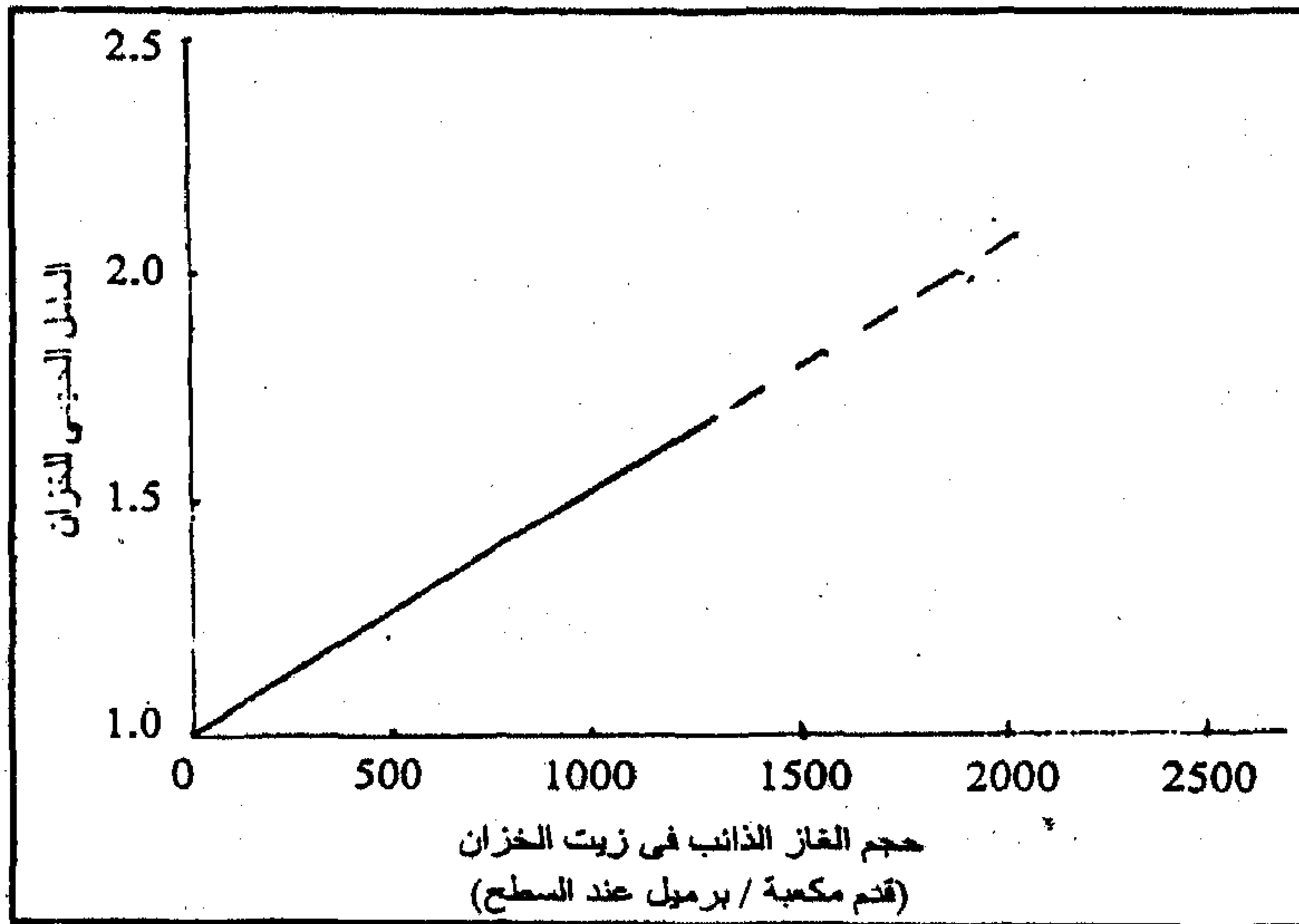
وبانطلاق الغاز من الزيت على السطح فإن حجم الزيت سوف يتناقص، فالبرميل الواحد من الزيت الذي كان عند ظروف الخزان الجوفي يكون عند السطح أقل من البرميل بسبب انفصال الغاز الذائب من الزيت (شكل ٢٥-٢)، ويسمى هذا التناقص بعامل الانكماش shrinkage factor، ويسمي برميل الزيت على السطح عند درجة 25°C وضغط 101.325KPa كيلوباسكال (أي 60°F وضغط ١٤،٧ رطل/بوصة مربعة) برميل الزيت المختزن على السطح stock tank barrel of oil (stb)، أما عدد البراميل من الزيت الخام تحت الظروف الجوفية للخزان التي نحتاج لإنتاجها لتنكمش إلى برميل من الزيت المختزن على السطح فتسمى العامل الحجمي للزيت formation volume factor (FVF)، ويتراوح هذا العامل بين ١،٠ و١،٧ وهو في الواقع مقلوب عامل الانكماش، وتتميز الزيوت ذات الانكماش المرتفع بعامل حجمي يقدر في المتوسط بحوالي ١،٤، أما الزيوت ذات الانكماش المنخفض فيبلغ العامل الحجمي بها نحو ١،٢، ويمكن تقدير العامل الحجمي من نسبة الغاز إلى الزيت المنتج وكلما ارتفعت هذه النسبة كان العامل الحجمي كبيراً (شكل ٢٥-٣).



شكل ٢٥-١: رسم تخطيطي يوضح العلاقة لنفس كميات الغاز والزيت تحت ظروف الضغط المختلفة (بركة تحتمشبعة، مشبعة، مشبعة مع وجود غطاء من الغاز).



شكل ٢٥-٢: التغير الحجمي لبرميل واحد من الزيت مذاب به ألف قدم مكعبة من الغاز تحت ظروف الخزان الجوفي ليصل إلى أقل من برميل من الزيت على السطح.



شكل ٢٥-٣: العلاقة بين حجم الغاز الذائب والعامل الحجمي للخزان.

وتحت السطح يكون الغاز في الخزان الجوفي تحت درجة حرارة عالية وضغط مرتفع، وعند وصوله إلى السطح تكون حرارته وضغطه قد تناقصا، ويتمدد الغاز ويزداد حجمه ويعرف حجم الغاز في الخزان التحتسطحي الذي يتمدد إلى قدم مكعبة واحدة على

السطح بالعامل الحجمي للغاز gas formation volume factor (B_g) مقدراً بـ rb/scf وهو يتوقف على درجة الحرارة والضغط وتكوين الغاز، ويقاس حجم الغاز الطبيعي بالقدم المكعبة القياسية standard cubic feet (scf) وهي حجم الغاز بالقدم المكعبة تحت الظروف السطحية من درجة الحرارة والضغط والتي تقدر عادة بـ 60^oF و14.7psia وربما اختلفت من موقع لآخر وحسبما تنص على ذلك اتفاقيات بيع الغاز.

حساب الاحتياطي البترولي:

يعرف الاحتياطي البترولي reserve بأنه حجم كميات الزيت أو الغاز التي يمكن إنتاجها من البئر أو الحقل مستقبلاً تحت الظروف الاقتصادية السائدة باستخدام التقنيات الحالية، ويقدر الاحتياطي البترولي بالبرميل المختزن على السطح في حالة الزيت الخام، وبالقدم المكعبة القياسية بالنسبة للغاز الطبيعي.

احتياطيات الزيت:

يمكن حساب احتياطيات الزيت بكل من الطريقة الحجمية ومنحنيات الهبوط:

وفي **الطريقة الحجمية** volumetric method تستخدم المعادلة الآتية والتي تتضمن عدداً من البرامترات البتروفيزيائية والخزانية التي يتطلب إيجادها في البداية للتعامل مع هذه المعادلة.

$$STOIIP = \frac{7758 \times V \times \phi \times So}{FVF} \text{ (bbls)}$$

حيث STOIIP (stock tank oil initially in place) هو حجم الاحتياطي من الزيت المختزن على السطح.

V: حجم النطاق المغل net pay volume من الخزان الجوفي مقدراً بالفدان– قدم acre-foot، وهذا الحجم هو حاصل ضرب مساحة الخزان البترولي (فدان) في السمك الفعال للخزان (قدم)، ولكي يتحول الفدان– قدم إلى برميل علينا أن نضربه في ٧٧٥٨، ويمكن استخدام وحدات القياس الحجمية الأخرى كالمتر المكعب وغيرها.

ϕ وS_o: المسامية الفعالة للخزان وقيمة التشبع بالزيت على الترتيب وكلاهما معاملان يمثلان نسبة مئوية أو كسراً عشرياً، ويمكن الحصول على أي منهما عن طريق بيانات تسجيلات الآبار وكذا من نتائج التحليل المعملي للعينات اللبية (راجع الفصل ١٨).

FVF: العامل الحجمي للزيت ويمكن تقديره من معرفة نسبة الغاز إلى الزيت المنتج أو من التحليل المعملي للموائع المنتجة.

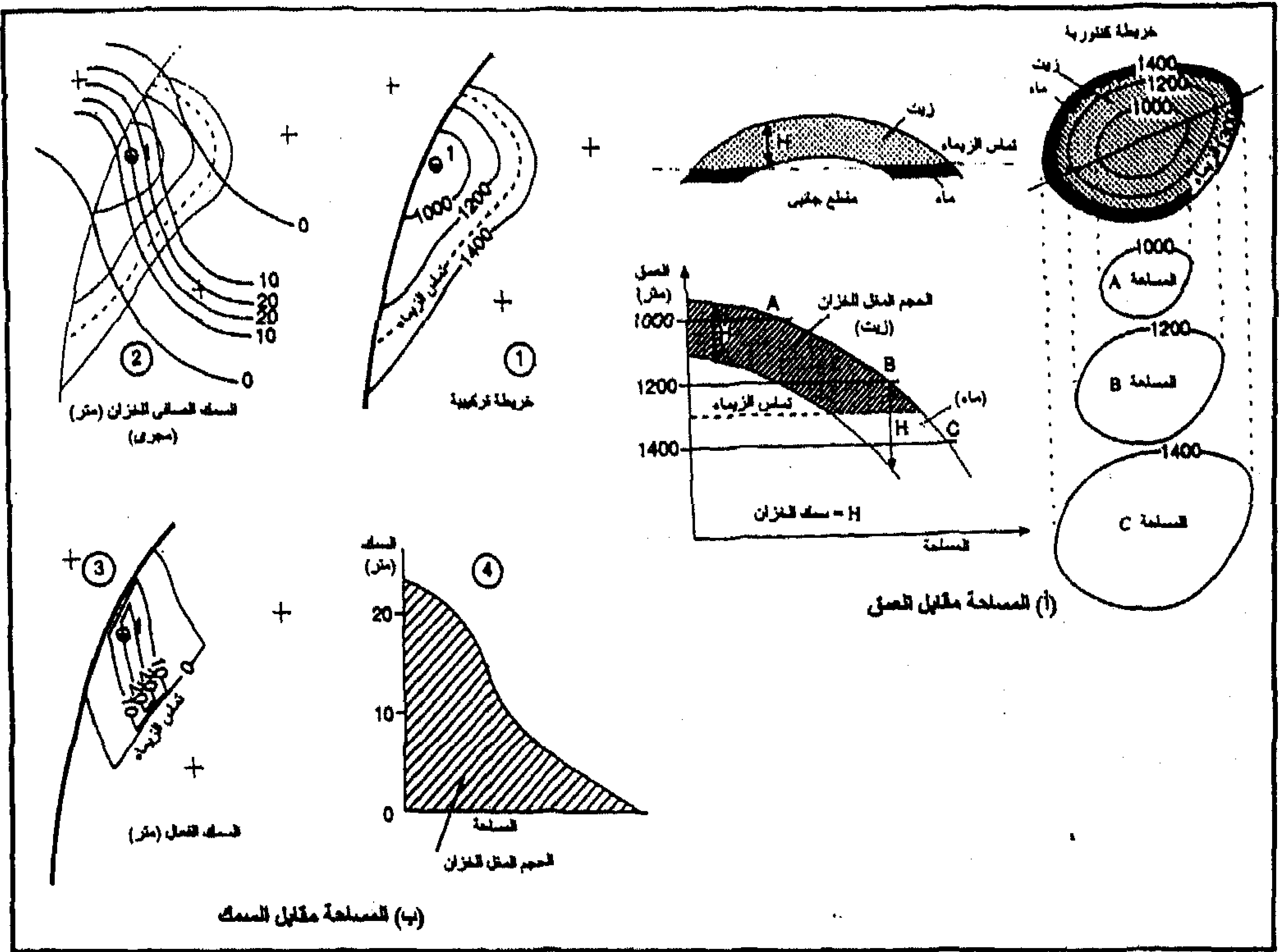
وبالنسبة لحجم الخزان البترولي (V) فيتم ايجاده باستخدام إحدى الطريقتين الآتيتين:

(١) العلاقة بين مساحة الخزان وعمقه area-depth method: ويلزم لهذا الغرض رسم خريطة كنتورية (شكل ٢٥-٤أ) على سطح الخزان (عادة السطح العلوي) بالإضافة إلى معرفة سمك هذا الخزان، ومن الخريطة الكنتورية تقاس المساحة داخل كل كنتور بواسطة جهاز البلانيمتر للمسطحات، ثم ترسم العلاقة بين المساحة والعمق ويكون المنحنى A ممثلاً للسطح العلوي للخزان ثم يرسم بعده منحنى السطح السفلي B بمعلومية السمك، وتكون المساحة داخل هذين المنحنيين هي الحجم المغل للخزان net pay volume أعلى تماس الزيباء.

(٢) العلاقة بين مساحة الخزان والسمك area-thickness method وتستخدم في هذه الحالة خريطة السمك للخزان البترولي حيث تقاس المساحة داخل كل كنتور (أعلي تماس الزيباء) مقابل السمك الذي يمثله وتوقع هذه العلاقة كما هو موضح بالشكل ٢٥-٤ب، وتكون المساحة داخل المنحنى هي الحجم المغل للخزان، وعادة ما تكون هذه الطريقة هي الأنسب خاصة في حالة الخزانات التي يتباين فيها السمك بسبب طبيعة الظروف الترسيبية، كما هو الحال في رواسب المجاري المائية.

وإذا كان المطلوب حساب حجم الاحتياطي القابل للاستخراج recoverable reserve أو ما يسمى أيضاً الاستخلاص الأقصى ultimate recovery(UR) يضرب ناتج المعادلة السابقة في عامل الاستخلاص recovery factor (RF) والذي يمكن تقديره بمعرفة آلية الدفع بالخزان ونفاذية النطاق المنتج ولزوجة الزيت الخام وهو مقدر كنسبة مئوية (راجع الجدول ٢٥-١)، وعليه تصبح المعادلة السابقة على النحو التالي:

$$UR = \frac{7758 \times V \times \phi \times So}{FVF} \times RF \quad (bbls)$$



شكل ٢٥-٤: التقدير الحجمي للاحتياطيات البترولية باستخدام:
(أ) طريقة المساحة مقابل العمق.
(ب) طريقة المساحة مقابل السمك.

مثال:

احسب حجم الاحتياطي للزيت القابل للاستخراج من خزان حجر رملي تبلغ مساحته ١٧٦٠ فداناً وسمكه المغل ٣٠ قدماً ومساميته الفعالة ٢٢٪ وتشبعه بالزيت ٨٥٪ والمعامل الحجمي ١.٣ وعامل الاستخلاص ٤٠٪.

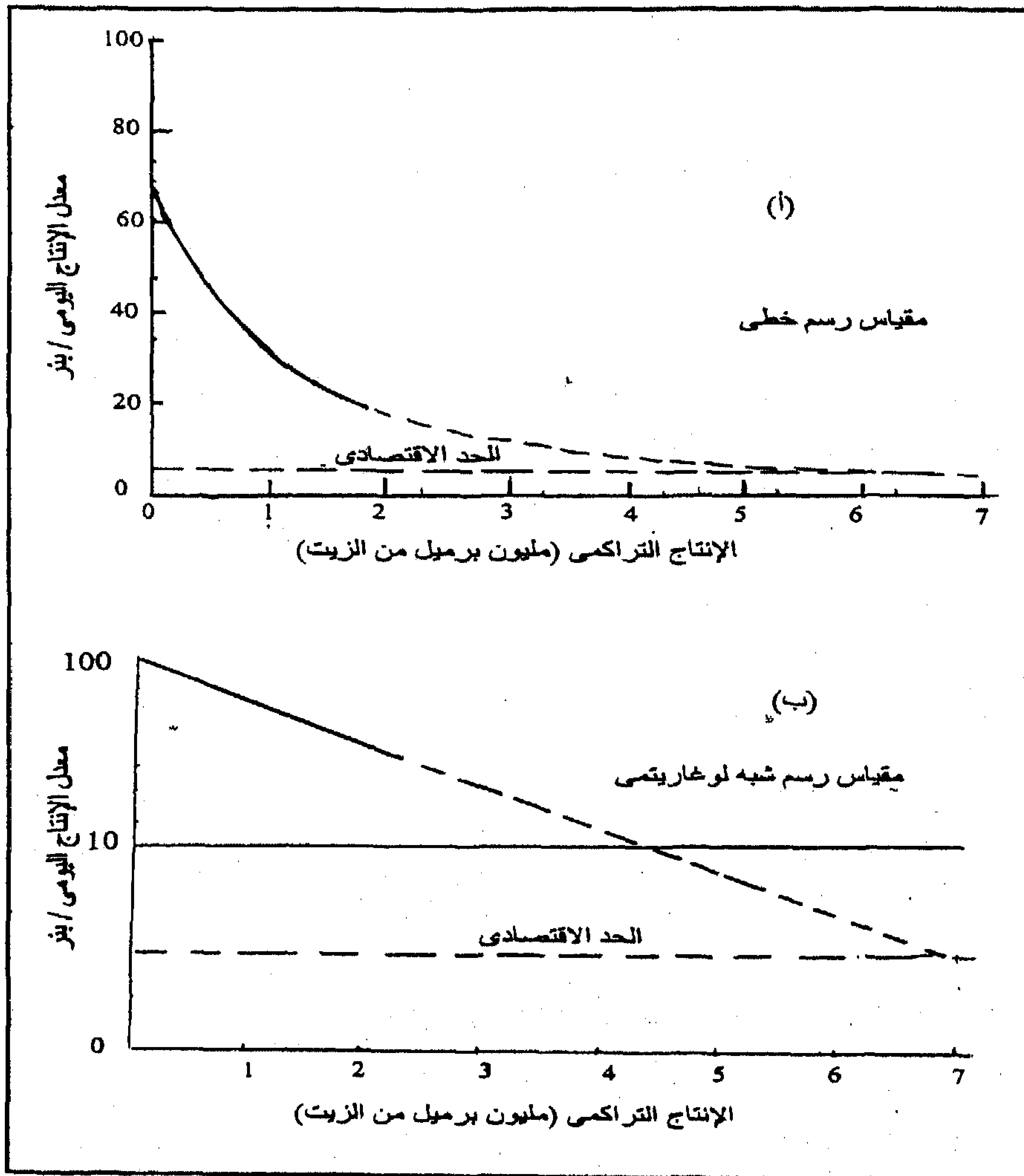
الحل:

$$UR=\frac{7758\times1760\times30\times0.22\times0.85}{1.3}\times 0.4 = 23.569.043 \approx 23.5 \text{ million barrels}$$

أما طريقة منحنى الهبوط decline curve method وهي الطريقة الثانية لحساب احتياطي الزيت فتعتمد في المقام الأول على بيانات الإنتاج حيث يتم إيجاد العلاقة بين معدل الإنتاج اليومي والانتاج التراكمي على مدى فترة زمنية، ومنها يمكن التنبؤ

بالإنتاجية المستقبلية للخزان الجوفي، وقد بنيت هذه العلاقة على أساس أن معدل الإنتاج يتناقص بشكل سلس ومنتظم خلال الفترة الإنتاجية كما أوضحنا من قبل.

ويمكن تمثيل هذه العلاقة رياضياً أو رسمها بيانياً كما هو موضح في الشكل ٢٥-٥أ وإذا كانت البئر المنتجة بواسطة الدفع بالغاز الذائب أو بالغاز الطليق فإن منحنى الهبوط يمكن رسمه باستخدام مقياس نصف لوغاريتمي كما هو موضح بالشكل ٢٥-٥ب:



شكل ٢٥-٥: حساب الاحتياطي البترولي من منحنى الهبوط

(أ) مقياس رسم خطي.

(ب) مقياس شبه لوغاريتمي.

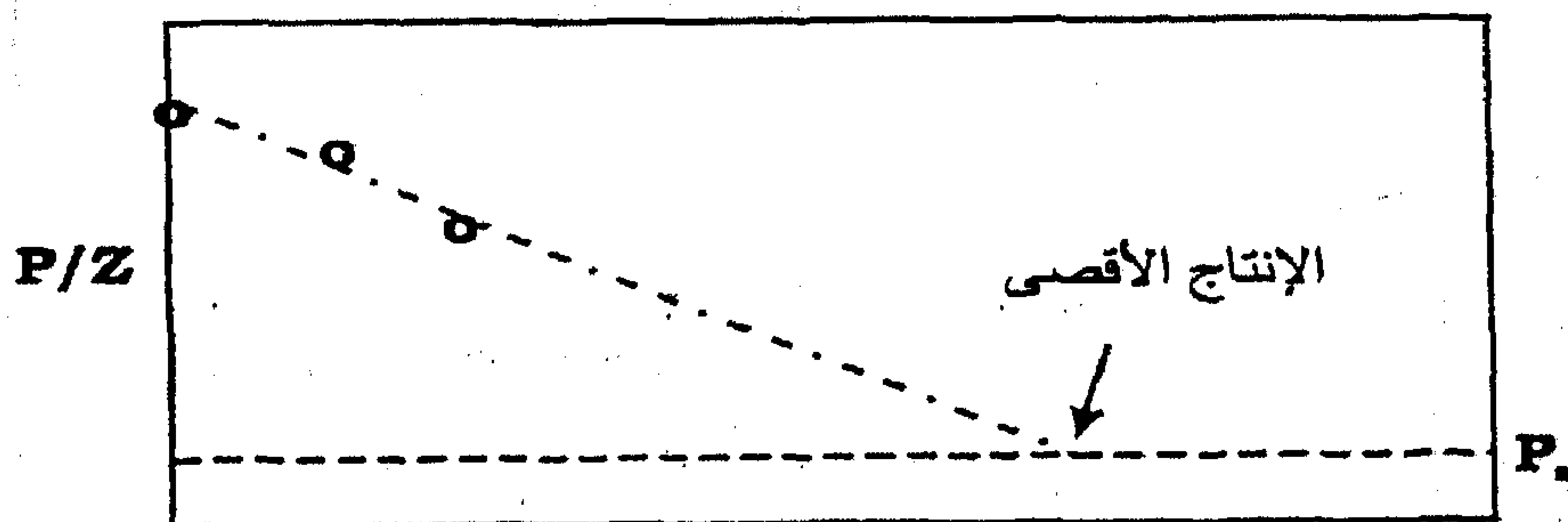
وفي أي من الحالتين يمد خط الحد الاقتصادى economic limit حتى يتقاطع متماساً مع منحنى الهبوط، ويعرف الحد الاقتصادى بأنه الوقت الذي عنده يكون العائد المالي من البئر مساوياً للتكلفة الإنتاجية، وتعطي نقطة تماس هذين الخطين مؤشراً للإنتاج المستقبلي للبئر وبالتالي تقديراً للاحتياطي من الزيت القابل للاستخراج.

احتياطيات الغاز:

يمكن تقدير احتياطيات الغاز بالخزان الجوفي من الطريقة الحجمية كما في حالة الزيت والطريقة التي تعرف بمخطط P/Z plot (شكل ٢٥-٦) حيث:

P: الضغط الأصلي للخزان الجوفي (وهو يتناقص مع إنتاج الغاز من الخزان).

Z: عامل (الانحراف) الانضغاطية compressibility (deviation) factor وهو قيمة تصحيحية للغاز الطبيعي المنتج بسبب انحرافه في مسلكه عن قانون الغاز المثالي تحت ظروف الضغط ودرجة الحرارة العالية داخل الخزان الجوفي ويتفاوت في قيمته بين ١،٢ و٠،٠٧، ويمكن تعيين هذا العامل بإستخدام مخططات الضغط والحرارة وتكوين الغاز الطبيعي والموضحة بالمراجع ذات الصلة.



شكل ٢٥-٦: العلاقة بين P/Z والإنتاج التراكمي للغاز وحساب الاحتياطي من هذا الغاز.

وفي الطريقة الحجمية يتم حساب حجم الغاز volume of gas مقدراً بالأقدام المكعبة القياسية (scf) من المعادلة التالية :

$$\text{Volume of gas (scf)} = \frac{43560 \times V \times \phi \times S_g}{B_g} \times RF$$

وهي نفس المعادلة المستخدمة في حالة الزيت باستثناء المضروب فيه ليصبح 43560 وذلك لتحويل الفدان- قدم إلى أقدام مكعبة ويكون S_g هو التشبع بالغاز، كما يتم حساب الحجم المغل للخزان (V) بنفس الطريقة التي تمت في حالة الزيت.

B_g : العامل الحجمي للغاز والذي يمكن تعيينه باستخدام الجداول والمخططات الخاصة بذلك.

مثال:

احسب الحجم الأصلي للغاز volume of gas initially in place (GIIP) بالأقدام المكعبة القياسية في أحد الحقول بافتراض أن ضغط الخزان هو 3250 psia ودرجة الحرارة 213°F وعامل انحراف الغاز(Z) ٠,٩١٢ ومساحة الخزان = ١٥٠٠ فدان وسمكه الفعال = ٤٠ قدماً.

الحل:

$$Bg = 0.02829\frac{ZT}{P}\text{ cu ft/scf} = \frac{0.02829\times0.910\times(460+213)}{3250} = 0.00533\text{ cu ft/scf}$$

$$GIIP = \frac{43560\times V\times \quad \times Sg}{Bg}$$

$$= \frac{43560\times1500\times40\times0.22\times0.77}{0.00533} = 83.07\text{ billion standard cubic feet} \simeq 83\text{Bscf}$$

يصعب الحل بعض الشيء في الغاز المصاحب للزيت نظراً لأن الغاز يأتي من مصدرين: الغاز الطليق والغاز الذائب الذي ينطلق من الزيت مع هبوط ضغط الخزان.

وفي حالة بئر منفردة يمكن تقدير احتياطي الغاز من مخطط P/Z، وإذا ما تم رسم العلاقة بين P/Z والإنتاج التراكمي نحصل على علاقة خطية وعندما يتقاطع الخط مع خط ضغط الهجر abandonment pressure يكون ذلك محدداً للإنتاج الأقصى للغاز من البئر المعنية (راجع شكل ٢٥-٦).

وضغط الهجر هو ذلك الضغط الأدنى للخزان والذي عنده يتقرر سد البئر وهجرها، وهو في العادة ما بين ٥٠ و٧٠ كيلوجرام/ سم^{2} (أي ٧٠٠ و١٠٠٠ رطل على البوصة المربعة)، وإذا ما كانت هناك فائدة اقتصادية من إطالة العمر الإنتاجي للغاز المستخدم

يمكن استخدام الضواغط compressors لزيادة ضغط الغاز المنتج إلى ضغط خط الأنابيب pipeline pressure.

طريقة اتزان المادة:

تقوم طريقة إتزان المادة material balance على نظرية بقاء المادة وهي أن المادة لا تفنى ولا تستحدث ولكنها تتحول من حالة إلى أخري، وما يحدث داخل الخزانات البترولية هو نوع من هذا القبيل، فمعادلة توازن المادة تربط العلاقة بين حجوم الزيت والغاز والماء التي تم إنتاجها من الخزان الجوفي والتغير الحادث في ضغط الخزان لحساب الحجوم المتبقية remaining بالخزان، وفي حالة الخزانات التي تعمل بالدفع بالماء يدخل جحم المياه المتجاوزة encroached من الخزان المائي إلى المعادلة.

وتكون معادلة اتزان المادة في صيغتها المبسطة وحيث تتكون الحجوم الأصلية من الزيت والغاز والماء بداخل الخزان البترولي على النحو التالي:

الحجوم الأصلية original = الحجوم المتبقية remaining + الحجوم المرتحلة removed

وللمزيد من التوضيح يمكن اختيار الصيغة الرياضية التالية:

$$N_p[B_o + (R_p - R_s)\,B_g] = N[(B_o - B_{oi}) + (R_{si} - R_s)B_g]$$

تمدد الزيت + الغاز المذاب = حجم الزيت والغاز المنتجين

حيث:

Np= الانتاج التراكمي من الزيت (برميل).

B_o= العامل الحجمي للزيت عند الضغط الحالي للخزان.

R_p= النسبة التراكمية للغاز إلى الزيت.

R_s= نسبة الغاز المذاب إلى الزيت عند الضغط الحالي للخزان.

B_g= العامل الحجمي للغاز.

N= الحجم الأصلي للزيت (برميل).

B_{oi}= العامل الحجمي للزيت عند الضغط الأصلي.

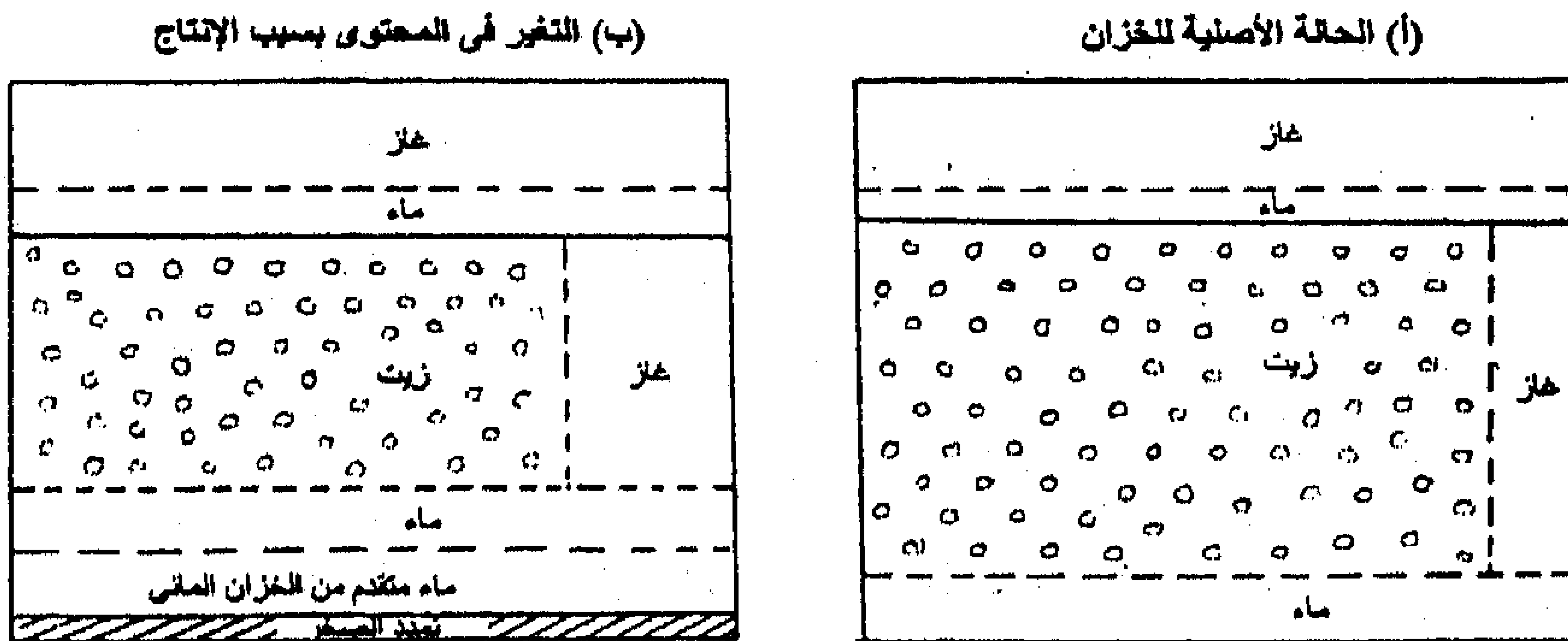
R_{si}= النسبة الأصلية للغاز المذاب إلى الزيت.

وقد وجد أن انخفاض الضغط في الخزان الجوفي ينتج عنه تمدد بسيط للماء الطبقي وأيضاً لمادة الصخر، كما أن حجم الخزان نفسه يتقلص بعض الشيء بنحو٧× ١٠^-٦ لكل رطل على البوصة المربعة (أي 1.4×10^{-6} KPa)، وبالطبع فإن هذا التقلص يساعد على دفع الماء الطبقي داخل الخزان المنتج، ويكون تقدم هذا الماء كبيراً إذا كان حجم خزان الماء أسفل الخزان البترولي هائلاً وممتداً إلى مساحات كبيرة، وهو أمر لا يتواجد بشكل شائع حيث إن الكثير من الخزانات المنتجة محدودة الحجم بالإضافة إلى عدم تجانسيتها أو وجود طبقة من الأسفلت أو القطران عند تماس الزيماء، وعندئذ يلزم استخدام طرق الدفع الاصطناعية التي سبق الحديث عنها حتى يمكن استنزاف القدر الأكبر من المخزون البترولي.

ويبين الشكل ٢٥-٧ رسماً توضيحياً حيث يمثل (أ) الحالة الأصلية للخزان بمحتواه من الزيت والغاز والماء، أما (ب) فتمثل الوضع الحالي للخزان وما اعتراه من تغيرات في توزيع الموائع به وكذا التشبع بالماء والهيدروكربون بعد انقضاء فترة إنتاجية حيث يلاحظ انخفاض كمية المخزون الأصلي من الزيت وارتفاع نسبة الغاز وتقدم جبهة الماء الطبقي وزيادتها بمرور الوقت.

تصنيف الاحتياطيات البترولية:

تصنف الاحتياطيات البترولية بناء على مدى وثوقية البيانات المستخدمة في الحسابات وخلوها من الغموض وتعرف الاحتياطيات المؤكدة proven reserves بأنها تلك الاحتياطيات التي جرى تقديرها استناداً إلى البيانات الواردة من الآبار التقييمية والتي تم اختبارها، وهذه الاحتياطيات يمكن تصنيفها على أنها منماة أو غير منماة.



(أ)شكل ٢٥-٧ رسم توضيحي يمثل الحالة الأصلية للخزان
(ب) وما اعتراه من تغيرات في موائعه أثناء الإنتاج.

والاحتياطيات المنماة developed reserves هي تلك المأخوذة من بيانات الآبار الموجودة فعلياً، أما الاحتياطيات غير المنماة undeveloped فهي تلك التي سوف يتم استغلالها من آبار لم يتم حفرها بعدُ أو من نُطُق مأمولة وراء القيسون ولم يجر تثقيبها بعدُ ويخطط لتنميتها في وقت لاحق بعد التثقيب.

أما الاحتياطيات غير المؤكدة unproven reserves فيمكن تقديرها بشكل مشابه لحال الاحتياطيات المؤكدة ولكنه نظراً لبعض الغموض الفني والاقتصادي فإن إنتاجها ليس مؤكداً بشكل كبير، وربما تم إدراجها كاحتياطيات مرجَّحة probable reserves أو احتياطيات محتملة possible reserves، وعلى حسب درجة الاحتمالية تسمى الاحتياطيات مؤكدة إذا كانت الاحتمالية أعلى من ٩٠٪، أما إذا كانت أكثر من ٥٠٪ فالاحتياطيات مرجحة، وإذا ما قدرت بأعلى من ١٠٪ فهي احتياطيات محتملة.

ديناميكية التقديرات وإزالة الغموض:

يكثر القول بأن الأرقام الواردة للاحتياطيات البترولية هي أرقام ديناميكية وهذا قول صحيح على الأرجح فهذه الأرقام قابلة للتغيير من فترة لأخرى وبالتالي عند رصد الأرقام يكون من الضروري ذكر التاريخ الذي عنده تمت هذه التقديرات وتتباين الأرقام تبعاً لتقدم مراحل العمل لاستغلال الحقل المستهدف وهذا أمر حقيقي فالأرقام التي نتعامل معها خلال مرحلة الاستكشاف قد لا تكون هي الأرقام في مرحلة التقييم appraisal stage، كما أن أرقام هذه المرحلة عادة ما تختلف عن مثيلاتها في مرحلة الإنتاج والتنمية development stage، فلكل مرحلة سماتها الخاصة، كما أن التعامل مع الخزان الجوفي ليس أمراً سهلاً حيث الطبيعة المبهمة لهذا الخزان والتشعب في خصائصة الجيولوجية والبتروفيزيائية وتعقد آلية الدفع وسلوك الموائع خلاله، ولا يمكن لنا أن نكتشف كل هذه الخصائص ونتعرف على جوانب الغموض بها مرة واحدة، بل يكون اكتشافها والتعرف عليها تدريجياً من خلال مراحل العمل المتعاقبة وحيث تتقلص أسباب الريبة، وما نراه في المراحل الأولى كثيراً مايختلف عنه في المراحل اللاحقة، ومن ثم كان من الضروري أن يسير العمل بمرونة ويقظة وأن يواكب المتغيرات الطارئة في أداء الخزان المنتج.

• **الاحتياطيات في مرحلة الاستكشاف:**

في مرحلة الاستكشاف يعتمد قرار حفر البئر على بيانات محدودة مستمدة أساساً من الخريطة السيزمية وما قد يتوافر من معلومات أخرى لمناطق مجاورة، كذلك فإن طبيعة النشاط في هذه المرحلة يغلب عليها التفاؤل والبسط وهو ما تتسم به الأرقام التقديرية لحجم المخزون من البترول، ولما كانت هذه البيانات ليست بالقدر الكافي لتقييم الخزان الجوفي فلا غرو أن يتعاظم بالتالي عامل المخاطرة risk factor في العثور على البترول وأن تشوب التقديرات الريبة والغموض، ولكن بمجرد أن يتم الانتهاء من حفر البئر الأولى والعثور على البترول تكون قد تجمعت لدينا معلومات جديدة حول طبيعة الخزان الجوفي تساعد على تقليص الغموض ومن ثم زيادة الثقة في التقديرات المحسوبة، ولكن الأمر لا يتوقف عند ذلك الحد حيث يتقرر حفر بئر أو بئرين أخريين لتقييم الكشف والحصول على مزيد من المعلومات التي تحتاجها خطة التنمية، ولما كانت هذه الأخيرة تتطلب اعتمادات مالية كبيرة فلابد أن تكون التقديرات المقدمة على قدر كبير من الصحة وألا تتأرجح القيم بين حدود واسعة تؤثر على مصداقيتها.

• **الاحتياطيات في مرحلة التنمية:**

يزداد توافر المعلومات في هذه المرحلة ويقل بالتالي مقدار الغموض بناء على المتابعة المتواصلة لأداء الخزان المنتج وتحديث البيانات والتقديرات السابقة ووضع التوقعات المستقبلية للعائد البترولي على مدى العمر الإنتاجي للحقل، وقد يقتضي ذلك تعديل الخطة الأصلية لكي تساير الواقع وتحافظ على استمرارية الإنتاج من الحقل وفق البرنامج المخطط ودون تعريض الخزان المنتج للمخاطرة وإهدار إنتاجيته، وعندما يصل المعدل الإنتاجي إلى الحد الذي تتجاوز فيه التكلفة الإنتاجية لوحدة التعامل (برميل زيت أو قدم مكعبة من الغاز) السعر المتوقع يتقرر إيقاف الإنتاج وهجر الحقل أو اتخاذ إجراءات أخرى لاستعادة احتياطيات إضافية بالحقل.

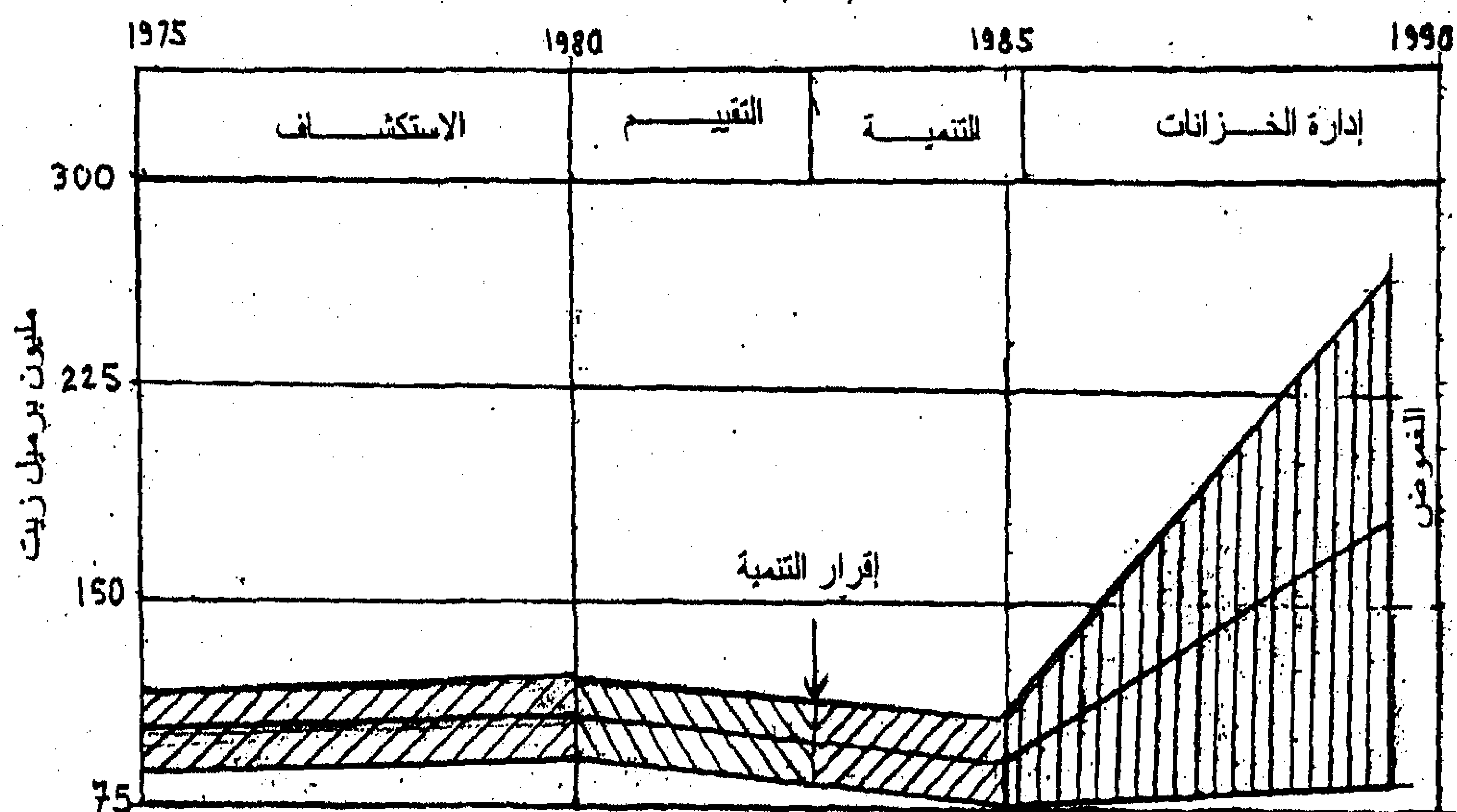
أمثلة حقلية:

من الإحتمال الأكبر أن تتكشف الأمور فيما يتعلق بطبيعة الحقل المنتج مع مرحلتي التنمية والإنتاج، فكلما زاد عدد الآبار المحفورة تعاظمت المعلومات الواردة وأصبح بالإمكان تحديث خطة التنمية وتصويب مسارها، غير أن ذلك قد لا يسير على هذا المنوال

فقد كانت هناك بعض الإخفاقات ولكنها لم تكن هي الغالبة، ونقدم في هذه الفقرة عدداً من الأمثلة الحقلية للاستدلال على ذلك.

١) المثال الأول (شكل ٢٥-٨):

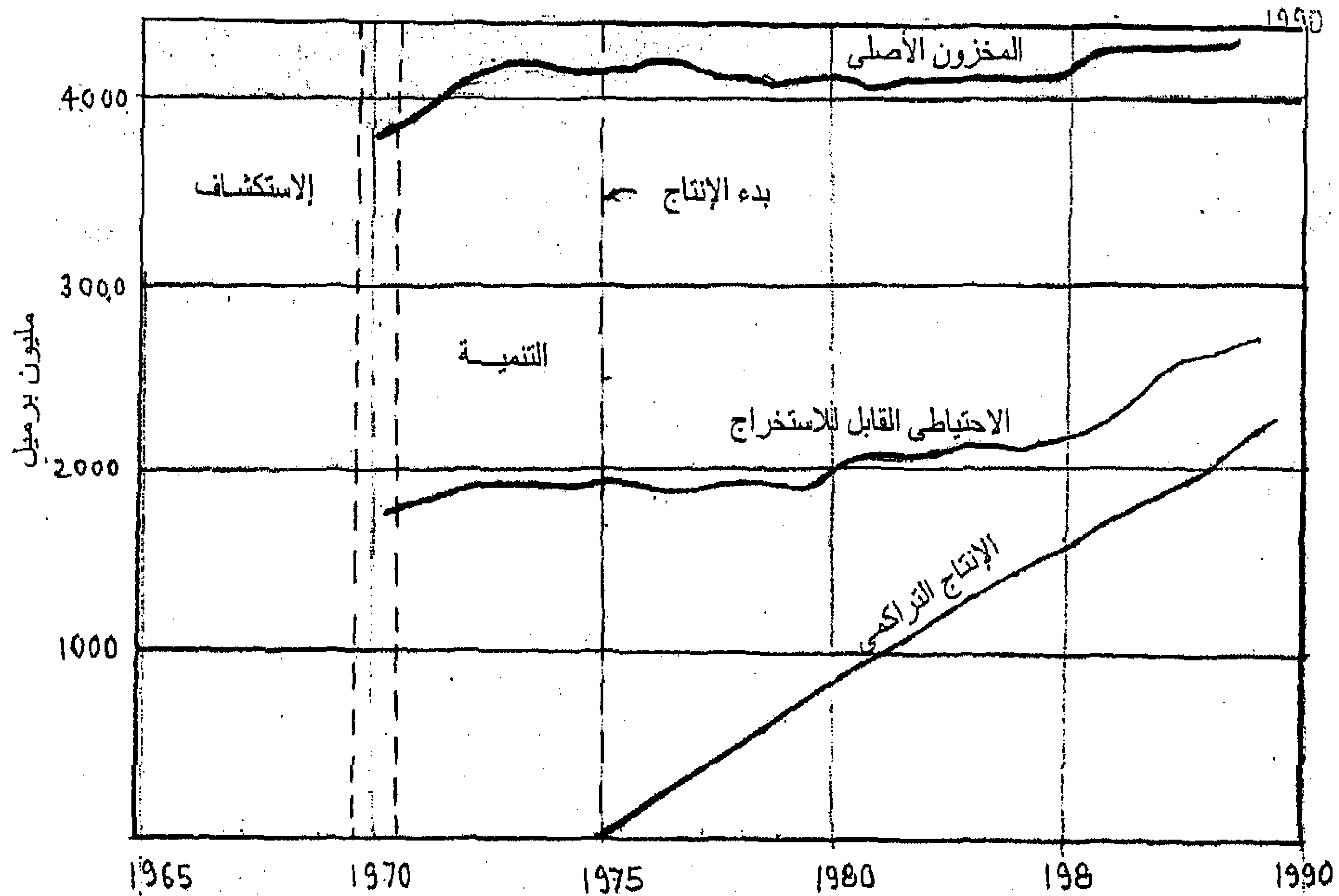
وهو يبين حالة لتزايد الغموض والريبة في تقديرات الاحتياطي في أحد الحقول مع تقدم مراحل التنمية على غير المتوقع، فعند إقرار التنمية قدرت احتياطيات الحقل ما بين ٧٥ إلى ١٠٠ مليون برميل، لكن بمرور الوقت وبعد عشر سنوات من بدء الإنتاج تغيرت قيمة الاحتياطيات لترتفع إلى ما بين ١٨٥ إلى ٢٨٥ ميلون برميل، وهذا التباين الكبير راجع أساساً إلى الغموض وعدم الفهم الجيد للخزان المنتج والذي يتكون من الصخور الجيرية ذات الطبيعة المعقدة. ويعتبر هذا المثال من الحالات الشائعة حيث ينزع العاملون إلى التقليل من شأن الغموض في المراحل الأولى من عمر الحقل ووضع افتراضات مبسطة لحساب الاحتياطي البترولي، ولكن ما أن تتقدم مراحل الإنتاج وتتكشف الامكانيات الفعلية للخزان الجوفي تتغير الصورة وهو ما قد يستدعي إجراء تعديل جوهري في أدوات الإنتاج وأسلوب الأداء.



شكل ٢٥-٨: مثال عن تزايد الغموض والريبة في تقديرات الاحتياطي البترولي مع تقدم الإنتاج.

٢) المثال الثاني (شكل ٢٥-٩):

وهو يمثل حقلاً من الحقول العملاقة ذات الطبيعة الجيولوجية البسيطة، ويتكون الخزان المنتج من صخور الحجر الرملي المتجانسة الخواص من حيث المسامية والنفاذية وجودتهما، ومن الشكل يلاحظ أن حجم الاحتياطي البترولي قد تزايدت قيمته بمقدار النصف تقريباً خلال فترة الإنتاج، وذلك راجع إلى الاتصال الجيد داخل الخزان وعدم وجود صدوع ذات شأن تعترض التركيب الجيولوجي للحقل، بالإضافة إلى وجود طبقات من الطفل تفصل بين نُطُق الحجر الرملي مما يساعد على إعاقة التقدم السريع لجبهة الماء الجوفي تحت خزان الزيت، وبالتالي إتاحة استنزاف لأكبر قدر من الاحتياطي البترولي. ومثل هذه النوعية من الخزانات المنتجة لا تحتاج عادة إلى جهة خاصة لإدارتها، لكن الأمر يستلزم بالضرورة إلماماً جيداً بخصائصها وإمكانياتها الإنتاجية في وقت مبكر فقد تسبب سوء التقدير في حالات مماثلة في عدم قدرة التسهيلات الحقلية التي أنشئت على استيعاب الطاقة الفعلية للحقل مما استدعى إجراء تعديلات وإحلالات في خطة التنمية تطلبت اعتمادات مالية إضافية ناهيك عن الجهد المبذول.



شكل ٢٥-٩: تزايد حجم الاحتياطي البترولي خلال فترة الإنتاج بسبب المعرفة الجيدة بطبيعة الخزان المنتج.

وبناء على ماسبق، يتضح أن التنمية الصحيحة للحقل البترولي تتطلب دراسة متأنية للخزان المنتج من أجل تقليص أو إزالة ما يكتنفه من غموض وريبة واستخدام كافة الأساليب والأدوات الفعالة التي تقدمها العلوم والتقنيات الحديثة، فاستخدام الأساليب الجيوفيزيائية المتقدمة مثل المسح السيزمي ثلاثي ورباعي الأبعاد يساعد كثيراً في تفهم الخزان الجوفي والتعرف على خصائصه المتباينة، كما أن الاتجاه إلى حفر الآبار الأفقية أو شديدة الميل يساعد أيضاً على التوصل إلى تشخيص أدق لهوية الخزان ومدى تعقده وذلك من خلال البيانات الواردة من الآبار، ولهذا وجب تحسين وتطوير أدوات التسجيل الكهربائي في الآبار حتى يمكن لهذه الأدوات أن تكون قادرة على إعطاء تفاصيل أكثر دقة حول تجانسية الخزان وتواصليته، كذلك فإن استخدام طرق التحليل الكمي والإحصائي يسهم بشكل فعال في نمذجة ومحاكاة الخزان والوصول إلى صور أقرب كثيراً إلى الواقع، كما أن الاعتماد على برامج الحاسب الآلي وأجهزة الكمبيوتر المتطورة يدفع إلى إنجاز العمل والنهوض به في إطار التكاملية بين التخصصات المختلفة ذات الاهتمام المشترك، وبالتالي إزالة غموض الخزان وتقليل الأخطاء في تقديرات الاحتياطيات البترولية عند وضع الخطط الإنمائية التي تستهدف تحقيق ربحية مناسبة دون الافراط في مكوناتها.

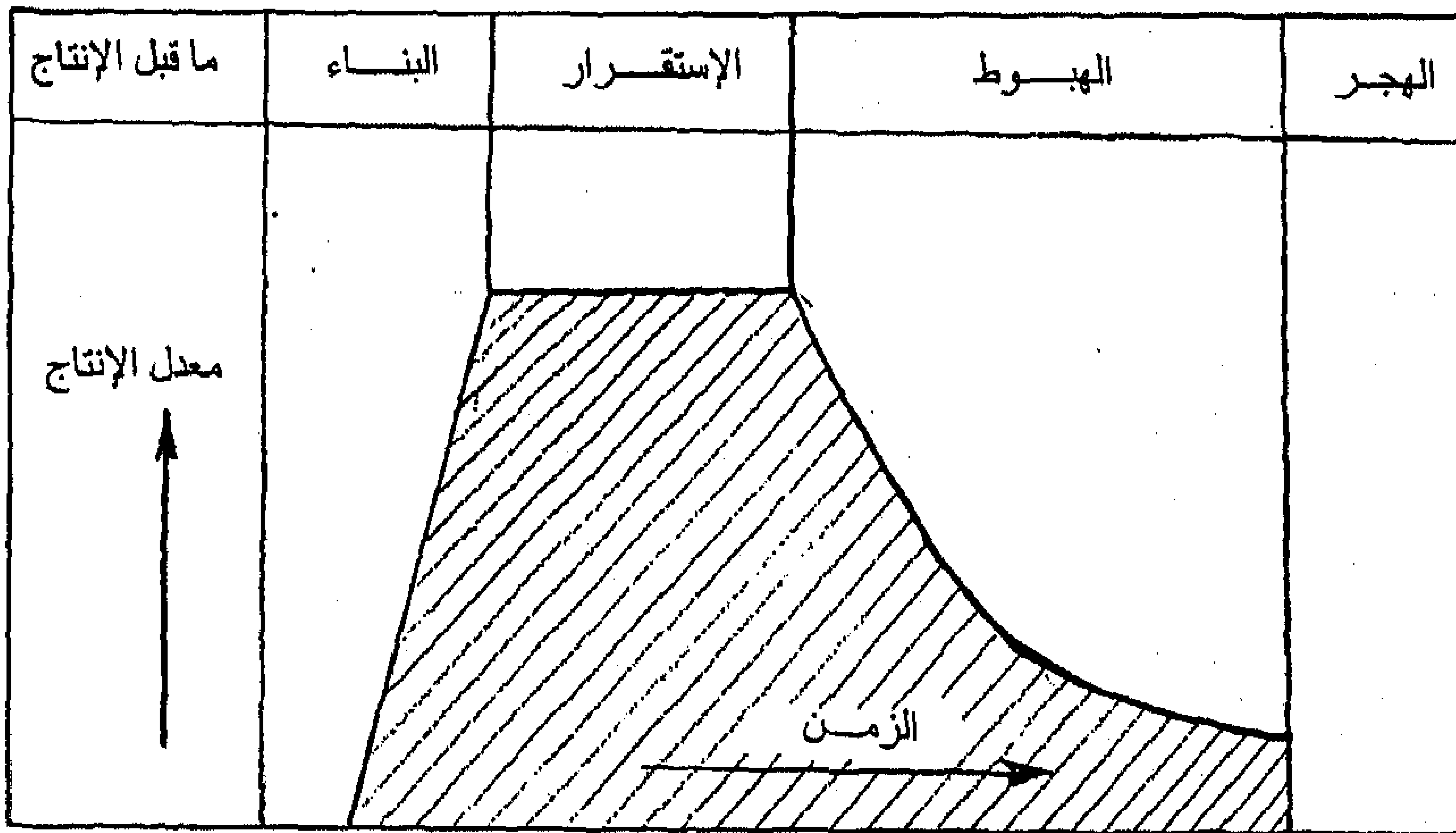
الفصل السادس والعشرون

إدارة الخزانات البترولية وتعظيم الإنتاجية

خلال مرحلة التنمية ومن اليوم الأول لبدء الإنتاج لابد من مراقبة الخزان الجوفي ومتابعته بكافة الوسائل والعمل على تعظيم إنتاجيته وبأقل تكلفة، وهنا يبرز الدور الكبير الذي تلعبه إدارة الخزانات من أجل تحقيق الهدف والحصول على أكبر عائد اقتصادي.

تعريف إدارة الخزانات:

تعرف إدارة الخزانات reservoir management بأنها استخدام الموارد البشرية والفنية المناسبة من أجل الاستغلال الأمثل للخزان البترولي منذ لحظة اكتشافه وحتى هجره عند النضوب، أي من مهده إلى لحده إن صح لنا هذا التعبير، فهي إذاً نشاط متواصل على مدى العمر الإنتاجي للحقل وليست عملية عابرة تقتصر على نشاط واحد، وهي أيضاً فن وعلم ويتوقف نجاحها على مهارة وخبرة ورؤية العاملين في مجالها ومن خلال الأسلوب الذي تنتهجه هذه الإدارة. والشكل ٢٦-١ يوضح رسماً نموذجياً لعناصر دورة حياة أحد الحقول بداية من مرحلة ما قبل الإنتاج إلى مرحلة الإنتاج ذاتها بشقيها المستقر والمتدني على مدى السنوات المتعاقبة وحتى الوصول إلى معدلات إنتاج لا تدر عائداً مالياً يغطي النفقات التشغيلية ويصبح هذا الحقل آنذاك غير اقتصادي ويلزم هجره والتخلي عنه وهي سمة الحقول على الدوام.



شكل ٢٦-١ : مثال نموذج لدورة حياة أحد حقول البترول خلال المراحل المختلفة.

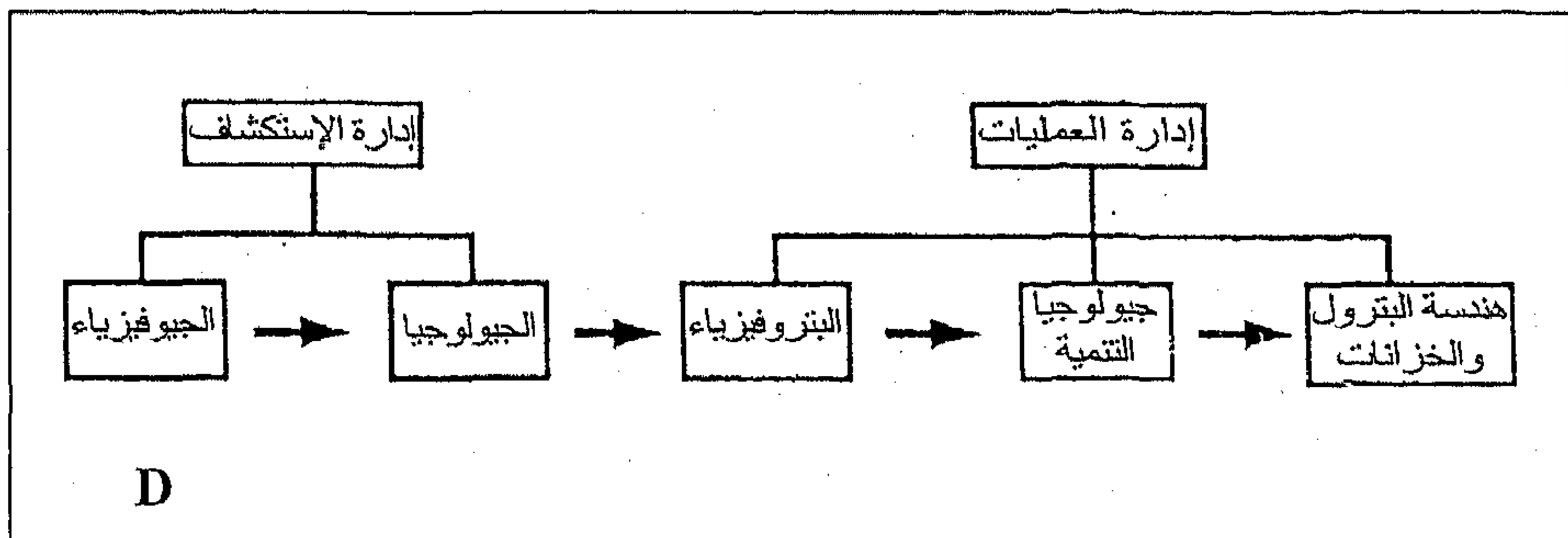
إدارة الخزانات بين الماضي والحاضر:

لم تكن إدارة الخزانات معروفة بأساليبها ومفاهيمها الحالية إلا في أواخر السبعينيات من القرن الماضي، عندما دعت الحاجة إلى تنمية الحقول العملاقة التي تم اكتشافها وقتئذ وكان لابد من إيجاد أساليب متطورة لتواكب المتغيرات وتحقق الأهداف في ظل التحديات القائمة.

ومن واقع الممارسات العملية في تنمية الحقول نرى أن إدارة الخزانات قد اعتمدت على نهجين أساسيين هما النهج التجزئي والنهج التكاملي.

(١) النهج التجزئي أو التعاقبي:

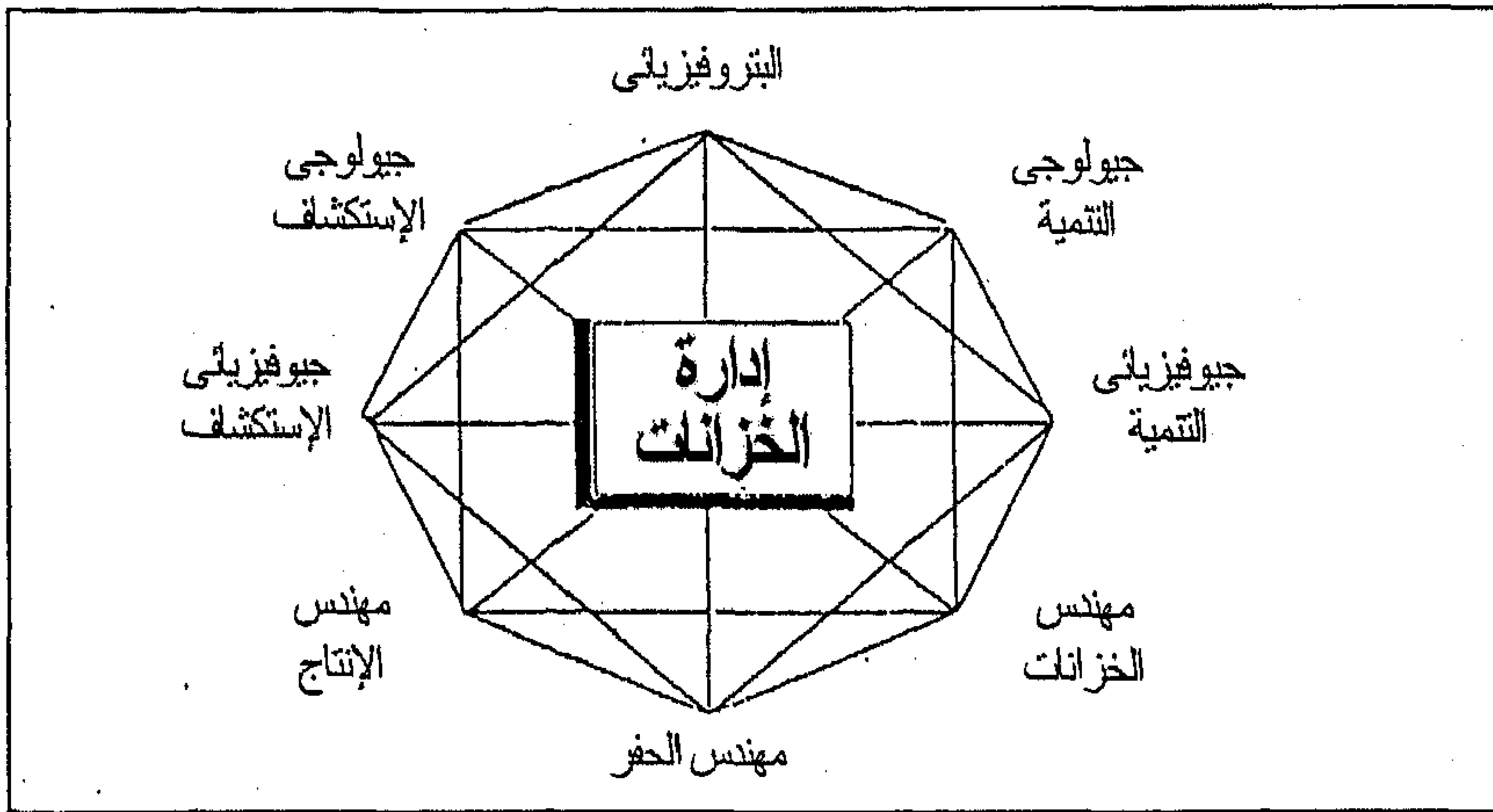
حتى وقت قريب كانت إدارة الخزانات تتبع أسلوباً مبسطاً يتمشى مع الهيكل التنظيمي للمنشأة والتبعية الإدارية للأفراد والواجبات المنوطة بهم، فكل إدارة لها مسئوليات محددة من خلالها يتم إنجاز العمل المطلوب في استقلالية تامة وتبعية كاملة للمدير المسئول، ونظراً لأن إدارة الخزانات ذات طبيعة متشعبة فقد كانت البيانات تتناقل من إدارة إلى أخرى لتستقر في النهاية عند مهندس الخزانات (شكل ٢٦-٢)، فالجيوفيزيائي التابع لإدارة الاستكشاف يقوم بإعداد البيانات والخريطة السيزمية للحقل ليتلقاها بعد ذلك زميله الجيولوجي الذي يقوم عندئذ بتقدير حجم المخزون البترولي، وبناء على هذه النتائج يبادر مهندس الخزانات بوضع تصوراته وتوقعاته بالنسبة لأداء الخزان وسلوكه خلال عمره الإنتاجي، وهذا النهج التجزئي أو التعاقبي sequential في الأداء وتداول البيانات قد ينشأ عنه اختلاف في الآراء والمفاهيم مما لا يساعد على الوصول إلى قرار حاسم بشأن تنمية الحقل وربما استدعى ذلك إجراء مراجعة تستغرق الوقت والجهد وتتسبب في تعطيل عملية التنمية مما تكون له آثاره السلبية على تحقيق الأهداف حسب الجدول الزمني المحدد.



شكل ٢٦-٢: النهج التعاقبي في إدارة الخزانات.

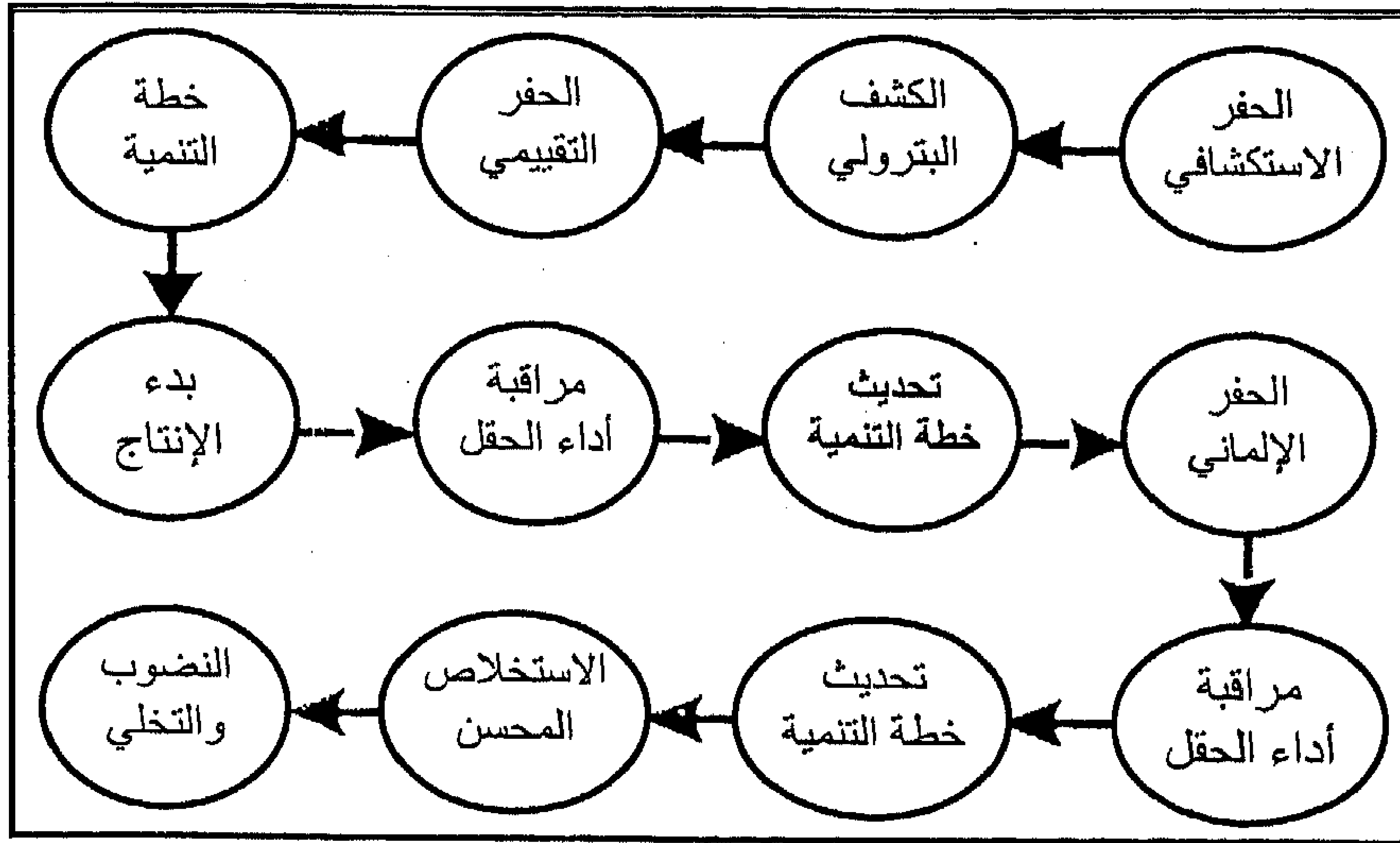
(٢) النهج التكاملي:

أما اليوم وبعد تعاظم الخبرة والمعرفة واستحداث التقنيات الراقية التي تتعلق بأدوات الإنتاج بالحقول أو بالمكاتب، بالإضافة إلى مواجهة التحديات التي فرضتها التغيرات المتلاحقة التي تجتاح العالم والتي تتمثل في قلة الاستثمارات والقيود والسياسات البيئية وانخفاض فرص العثور على اكتشافات بترولية جديدة وضرورة العمل على تعظيم العائد من الحقول الحالية من أجل عائد أكبر، كان لابد من تحسين وتطوير أسلوب إدارة الخزانات عن طريق العمل المتكامل integrated الذي تسوده روح الفريق ويتمتع الأفراد من خلاله بالثقة والمسئولية المتبادلة (شكل ٢٦-٣)، ولم يعد للنهج التجزئي أو التعاقبي مكان ذو شأن الآن.



شكل ٢٦-٣: النهج التكاملي في إدارة الخزانات.

وتجدر الإشارة إلى أن فريق العمل المتكامل لم يبق تشكيله قاصراً على عناصره الأساسية من الجيوفيزيائيين والجيولوجيين ومهندسي الخزانات بل رأى المسئولون وجوب ضم عناصر جديدة ذات اهتمامات مشتركة بين العاملين بالحقول وإدارتي العمليات والمشروعات بهدف المشاركة الجماعية على نطاق واسع وأشمل والاستخدام الأمثل للموارد المتاحة ومواكبة المراحل المتعددة التي يمر بها الحقل بدءاً من إنتاجه المبكر وانتهاء بنضوبه والتخلي عنه (شكل ٢٦-٤).



وبلا شك فإن التعامل مع البيانات الواردة من المصادر المختلفة (سطحية وتحتسطحية) وصهرها في بوتقة واحدة ثم تناولها بالتحليل والتفسير من خلال فريق العمل المتكامل سوف يساعد كثيراً في الوصول إلى أفضل التصورات عند وضع خطة التنمية أو تحديثها إذا ما لزم الأمر ذلك، وأيضاً عند التفكير في تطبيق إحدى طرق الاستخلاص المحسن قبل الشروع في هجر الحقل والتخلي عنه بصفة نهائية، وهو ما سوف يرد شرحه فيما بعد.

خطة التنمية والعوامل المؤثرة :

بالرغم من النجاحات التي حققتها إدارة الخزانات في حالات كثيرة إلا أننا لا نستطيع إغفال عدد من العوامل الفنية والمالية التي قد تؤثر بالسلب على النتائج المرجوة من خطة التنمية، فبسبب الطبيعة المعقدة للخزان الجوفي من حيث التركيب الجيولوجي والهندسي له من الصعب بناء نموذج محاكاة simulation model يماثل تماماً الوضع الحقيقي للخزان في باطن الأرض، كما أن عدداً من العناصر التي تضمنها هذا النموذج قد جاء افتراضها بشكل غير مؤكد، وربما كانت هناك عوامل أخرى لم تؤخذ في الحسبان لعدم إمكانية إدراكها بسبب ما يكتنفها من غموض وريبة uncertainty، وعليه فإن الحجم المقدر لكميات الخام القابلة للاستخراج يكون رقماً ديناميكياً قابلاً للتغيير، كما أن معدل الإنتاج من الخام قد يختلف عن التوقعات المنتظرة مما يؤثر بالتالي على التكلفة التشغيلية لوحدة الخام من الزيت أو الغاز الطبيعي، بل إن منظومة التسهيلات الحقلية من خطوط

لوحدة الخام من الزيت أو الغاز الطبيعي، بل إن منظومة التسهيلات الحقلية من خطوط الأنابيب والفواصل والضواغط وصهاريج التخزين ووحدات المعالجة وتصدير الخام وغيرها قد تكون لها انعكاساتها على إستراتيجيات إدارة الخزانات وحجم الاستثمارات، كذلك فإن أحداً لا يستطيع التنبؤ بسعر الخام المنتج بسبب أوضاع الأسعار التي تتعرض لعدم الاستقرار من وقت لآخر والتي وصلت في الآونة الأخيرة إلى ما يربو على مائة دولار للبرميل، كما أن عامل المخاطرة واحتمالات النجاح هما من سمات خطط التنمية نظراً للطبيعة المعقدة للخزان الجوفي، لذا تتعامل منظومة إدارة الخزانات مع مبدأ الحوارات والخيارات المتعددة.

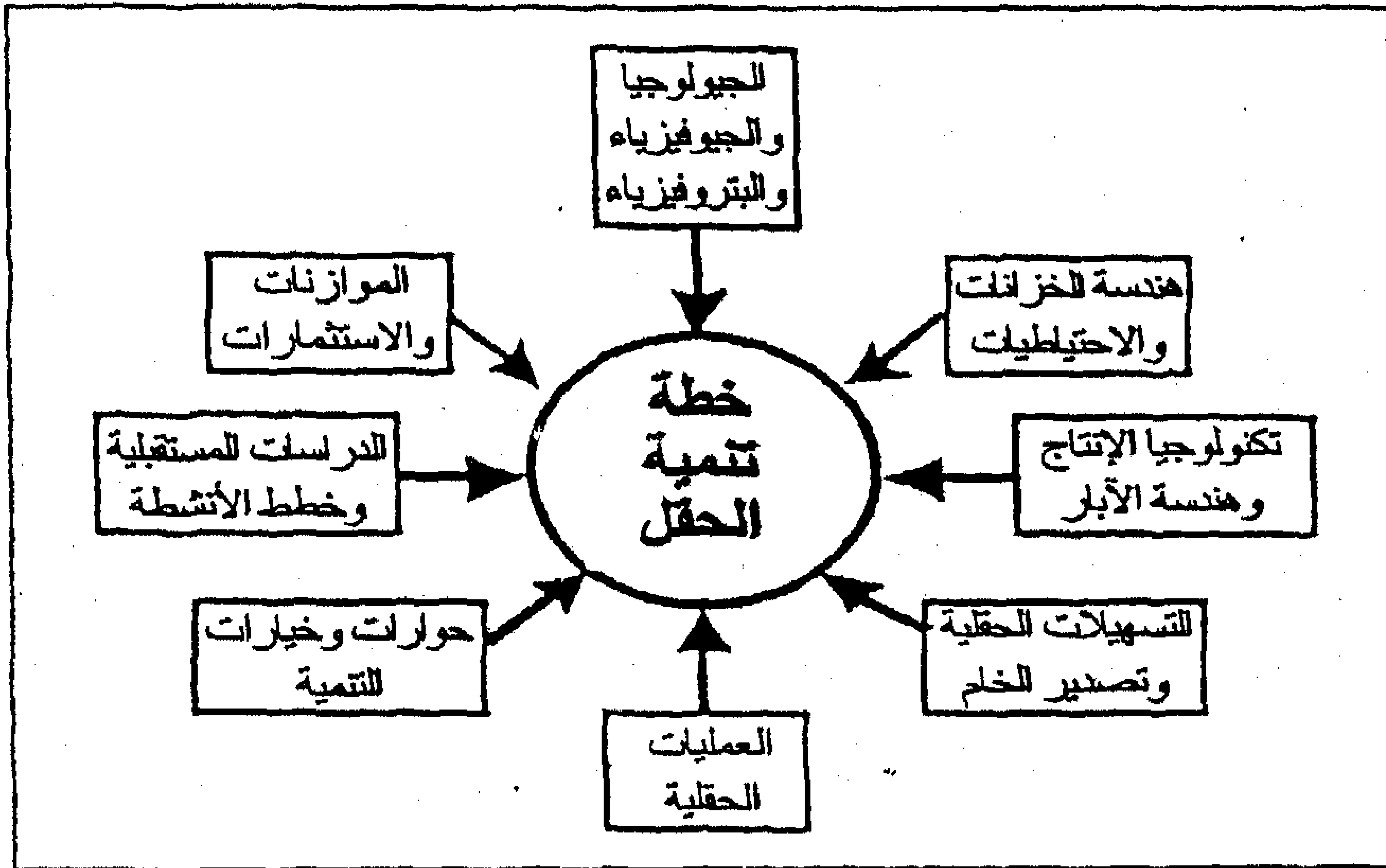
فعلى سبيل المثال ومن واقع الدراسة التي أجريت بشأن تنمية أحد الحقول بمنطقة خليج السويس أظهرت النتائج إمكانية استخدام الرفع الاصطناعي أو الحقن بالماء كخيارين لتعظيم إنتاجية الحقل وتحقيق احتياطيات بترولية إضافية قدرت آنذاك بنحو ٧-١٠ مليون برميل، ومع أن العائد البترولي من الحقن بالماء يفوق مثيله في حالة الرفع الإصطناعي إلا أن الخيار الأول لم يكن المفضل نظراً لارتفاع تكلفته (حوالي ٣٠ مليون دولار) وارتفاع نسبة المخاطرة لأسباب تتعلق بالتركيب الجيولوجي للحقل وسلوك الخزان الجوفي. ولا يعني هذا المثال أن يكون القرار دائماً في جانب الخيار الأقل مخاطرة فربما كان الخيار الأعلى مخاطرة هو العائد بالربحية الأكبر، لذا كان على الإدارة العليا للشركة اتخاذ القرار المناسب الذي يتواءم وأهدافها الإستراتيجية.

دراسات تنمية الحقول:

تمثل الدراسات العمود الفقري في إدارة الخزانات وتنمية الحقول، ذلك أن التعامل مع الخزانات البترولية يتم من خلال خطة مدروسة، وترتبط هذه الخطة بالإستراتيجيات التي تضعها الإدارة العليا للشركة أو المؤسسة لتحقيق الأهداف على المدى القصير والطويل. وتتضمن الخطة العديد من الجوانب الفنية والمالية وهي ثمرة الجهد الكبير والمشاركة الجماعية لفريق العمل المكلف بهذه المهمة والمشكل من أفراد ذوي اهتمامات مشتركة ويعمل الفريق تحت قيادة خبير team leader على درجة عالية من الكفاءة وإلمام كبير بطبيعة المهمة، ويدخل ضمن اختصاصاته التنسيق بين أعضاء الفريق ومتابعة التقدم

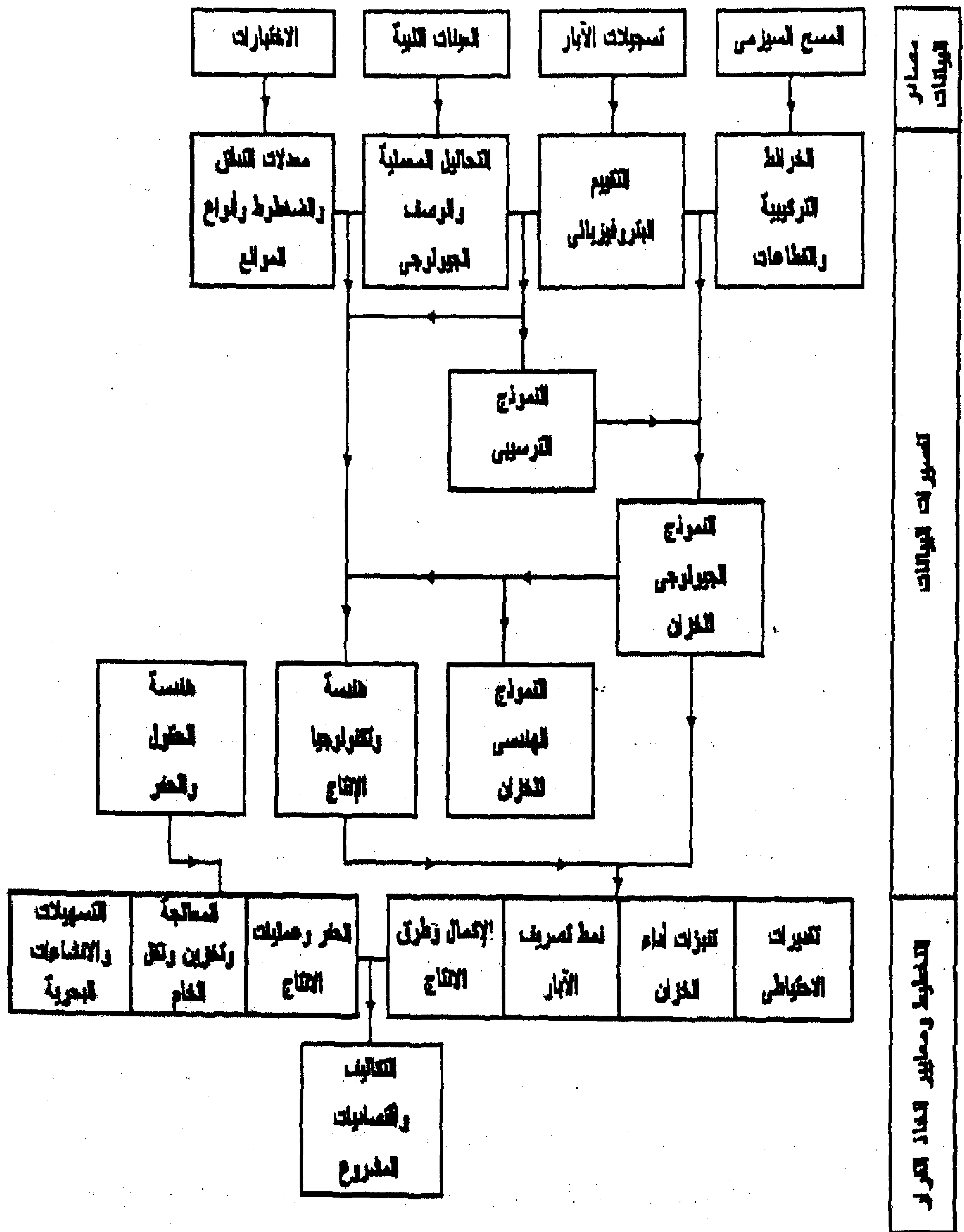
في الأداء والدعوة إلى الاجتماعات والمناقشات وبلورة الأفكار وصياغة النتائج لكي تجيء الخطة متكاملة وتفي بأغراضها.

وليس إعداد الخطة بالأمر اليسير بل قد يستغرق ذلك عدة أشهر وربما عاماً أو أكثر، ويتوقف حجم الخطة ومكوناتها على طبيعة الهدف وحجم الاستثمار المخصص. وقد يتطلب الأمر الاستعانة ببيوت الخبرة أو الاستشاريين المعتمدين ضماناً لتكامل العمل وإثرائه. ويبين شكل ٢٦-٥ نموذجاً للإطار العام لإحدى خطط التنمية لحقل من الحقول وما تتضمنه من أنشطة متباينة تتضافر فيها جهود أهل العلم والهندسة والمال والإقتصاد من أجل هدف واحد.



شكل ٢٦-٥: نموذج لإحدى خطط التنمية للحقول.

ونظراً للتغير الذي يحدث في سلوك الخزان الجوفي أثناء مرحلة التنمية فإن الخطط الأولية قد تعقبها خطط مرحلية أو أن تدخل عليها إضافات أو تعديلات في ضوء المعطيات المستجدة وبذلك لا تبقى الخطة الأصلية في وضع جامد لا يواكب الأحداث. والشكل ٢٦-٦ يوضح هيكلاً تنظيمياً لتلك الدراسات وأركانها الثلاثة الرئيسة والتي تشمل مصادر البيانات وتفسيرات هذه البيانات وكذا التخطيط الجيد للمشروع ومعايير اتخاذ القرار بشأن تنمية الحقل قيد الدراسة.



شكل ٢٦-٦: الهيكل التنظيمي لخطوات العمل والدراسات المختلفة في مرحلة ما قبل التنمية بالحقول.

وكما سبق الإشارة فإن دراسات تنمية الحقول تختلف باختلاف الغرض منها، فقد تكون لأهداف إستراتيجية طويلة الأجل أو لحل مشكلات على المدى القصير.

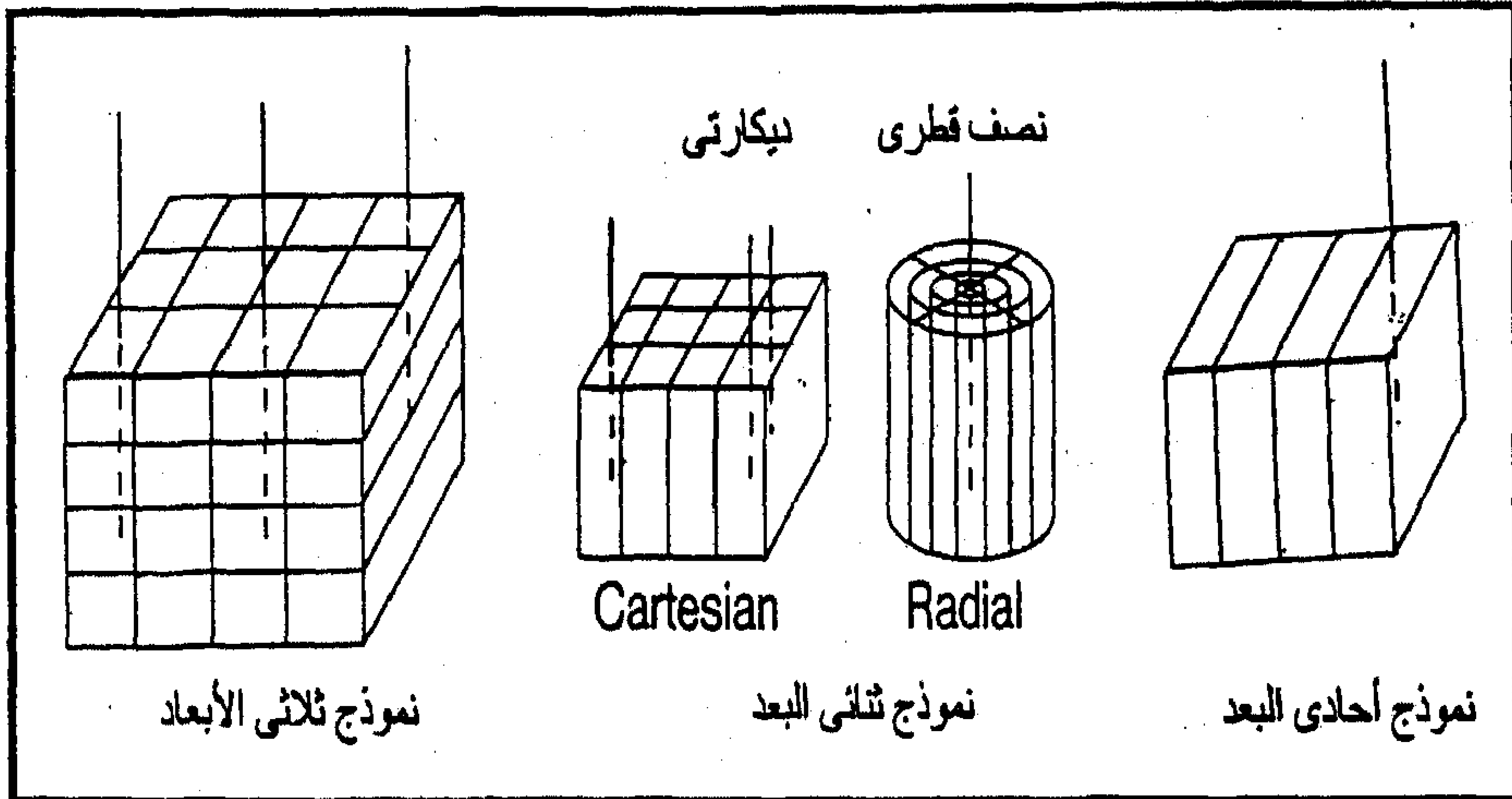
ويتركز الاهتمام بالنسبة للدراسات طويلة الأجل حول القضايا الرئيسة كاستحداث تغييرات جوهرية على منظومة العمليات مثلاً بهدف الحصول على احتياطيات بترولية إضافية وتعظيم العائد كأن يتم ذلك عن طريق استبدال الحفر الرأسي لآبار التنمية وآبار الحقن بالحفر الأفقي، أو إدخال تقنية جديدة لاستخراج الخام من الخزان الجوفي بدلاً من النظام القائم، وفي جميع الحالات فإن حجم الاستثمارات يكون كبيراً ويحتاج إلى قرار صائب ومبرر.

أما الدراسات قصيرة الأجل (١-٣ أشهر) فتتناول أساساً المشكلات المحدودة والتي تنشأ أثناء عمليات الإنتاج مثل مشكلة تدني ضغط الخزان الجوفي بمعدل أسرع مما كان متوقعاً أو زيادة نسبة المياه المصاحبة للزيت المنتج أو تكوُّن القشور والترسبات داخل البئر، وتقوم مجموعة العمل المتخصصة بإجراء هذه الدراسات وربما احتاجت إلى الاستعانة بخبرة من الخارج من خلال الشركات والمؤسسات الخدمية المتخصصة. ومهما اختلفت نوعية الدراسة فإن الإعداد والتخطيط الجيد لها وتحديد الأهداف والأبعاد من النواحي الفنية والمالية واقتناع الإدارة بجدوى هذه الدراسة دون مغالاة أو سوء تقدير هي أمور لابد منها وعلى الأخص بالنسبة للدراسات طويلة الأجل والتي عادة ماتتضمن برامجها استثمارات ضخمة ربما وصلت إلى عدة ملايين من الدولارات. كذلك فإن نجاح الدراسة يتوقف على طبيعة الموارد المستخدمة سواء أكانت بشرية أو مادية وكلما كان فريق العمل متجانساً واتسم بالمهارة والخبرة كان الأداء ناجحاً ومثمراً، كما ينبغي أن تكون البيانات المدخلة ذات جودة عالية كيفاً وكماً، فعلى هذه المدخلات تتوقف المخرجات وبالتالي تتحدد النتائج.

نمذجة ومحاكاة الخزانات:

تعتبر محاكاة الخزانات reservoir simulation من التقنيات الحديثة التي تقوم على استخدام التمثيل الرياضي لبناء الخزان الجوفي بواسطة الحاسوب وذلك من خلال قوالب (بلوكات) شبكيةgrid blocks ذات أنماط مختلفة (شكل ٢٦-٧) بحسب الغرض والتفصيل المنشود، وتهدف المحاكاة في المقام الأول الوصول إلى شكل يصور التنبؤ الديناميكي للأداء المستقبلي للخزان، وتحتوي القوالب الشبكية على العديد من البيانات والمعلومات التي تتعلق بالخصائص البتروفيزيائية والخزانية كالمسامية والنفاذية والتشبع

بالماء وكذلك خصائص الموائع داخل الخزان المنتج مثل اللزوجة وقيم الضغط والحجم والحرارة (PVT) وغيرها من المدخلات، وعلى حسب الغرض المستهدف يتحدد عدد القوالب والتي تتراوح ما بين ١٠٠ و١٠٠٠٠٠ إذا ما كان الهدف هو دراسة مستفيضة للتنبؤات الإنتاجية لحقل من الحقول وتحديد مواقع الآبار المستقبلية ومسافات التثقيب المزمعة وكذا الاستخلاص الثانوي وغير ذلك واستخدامها كأساس مرجعي history match لنموذج المحاكاة حتى يمكن بالتالي تعديل نمذجة الخزان reservoir modelling لتتمشي والمعطيات المستجدة وتكون النمذجة المحدَّثة updated أكثر فاعلية للتنبؤ بالأداء الديناميكي والمستقبلي للخزان، كما أن هذه النمذجة قد أصبحت من الأمور المعتادة في هندسة الخزانات التي يمكن إجراؤها دورياً كل سنتين أو خمس سنوات.



شكل ٢٦-٧: أنماط مختلفة للقوالب الشبكية المستخدمة في نمذجة ومحاكاة الخزانات.

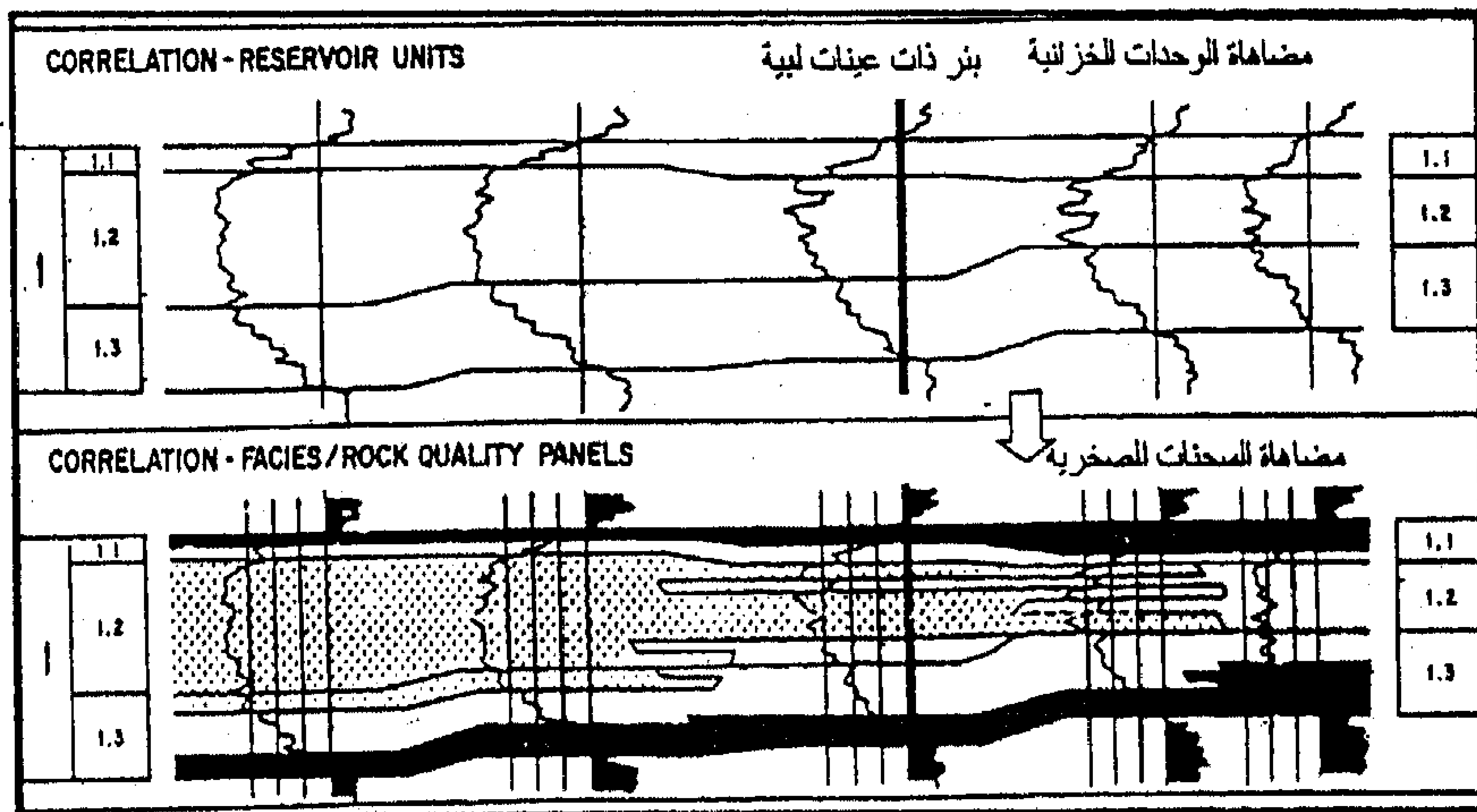
وتجدر الإشارة إلى أن نمذجة صخور الخزانات الجيرية تكون أصعب وأعقد من مثيلاتها في حالة الصخور الفتاتية والحجر الرملي، ويرجع السبب في ذلك إلى تعرض الصخور الجيرية لتأثيرات العمليات اللاحقة diagenetic processes مما يؤثر على توزيعات النفاذية الأفقية والرأسية ووحدات التدفق داخل الخزان، وتتضمن عملية النمذجة ومحاكاة الخزان الخطوات التالية:

- تعيين سحنات facies الصخر الخزان من خلال بيانات العينات اللبية وتسجيلات الآبار.

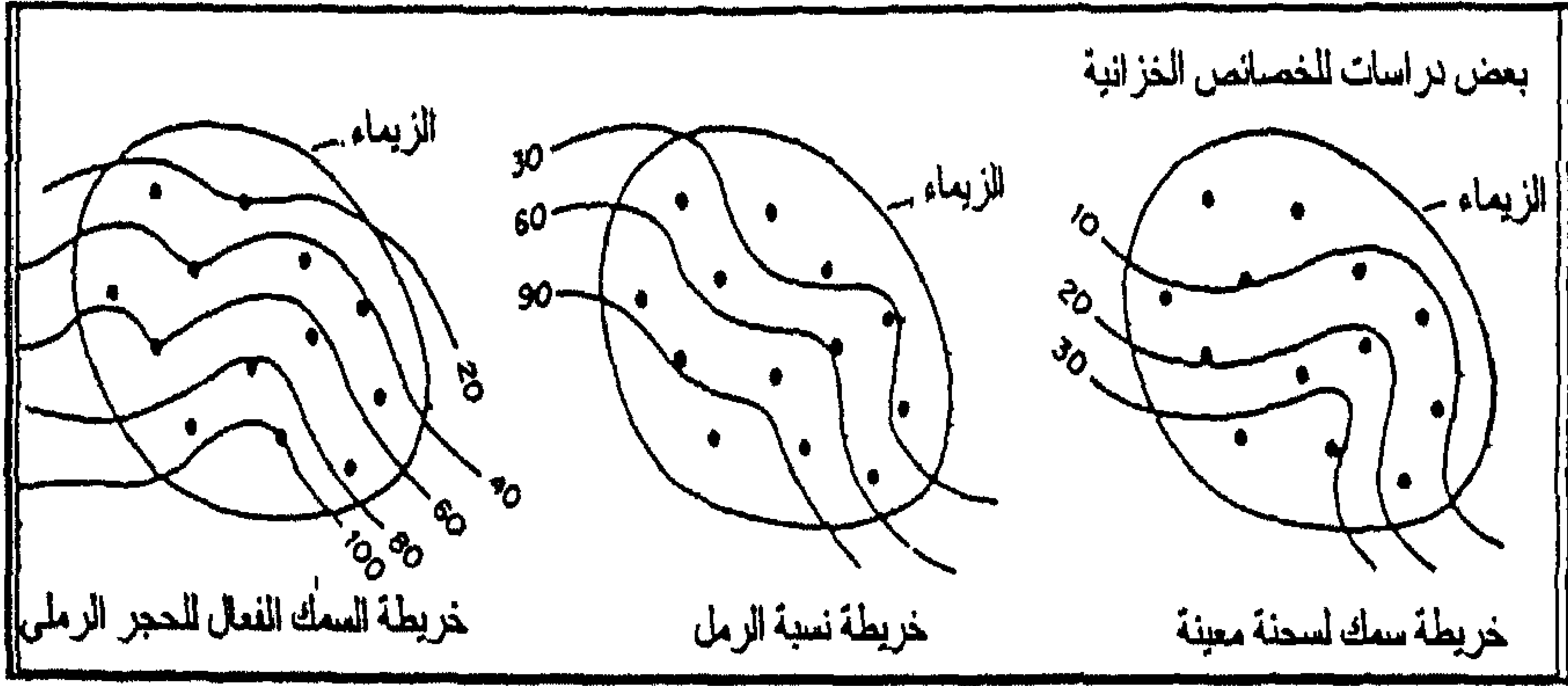
- توصيف نوع الصخر وهندسته وبيئته الترسيبية وتحديد خصائصه البتروفيزيائية خاصة فيما يتعلق بالنفاذية وتوزيعاتها.
- مضاهاة الآبار ومقارنة الطبقات للحصول على إطار ملائم لنموذج المحاكاة.
- تحديد أنسب القوالب الشبكية لوحدات تدفق الموائع flow units بالخزان الجوفي.
- تخريط mapping خصائص الخزان الأساسية كالسمك والمسامية والنفاذية والتشبع بالماء والضغط وغيرها لكل قالب شبكي في كل طبقة منفردة.

ويوضح الشكلان ٢٦-٨ و٢٦-٩ مثالين لنمذجة الخزانات: الأول يتعلق بمضاهاة الطبقات للتعرف على سحنة الخزان المنتج ووحدات التدفق بداخله من واقع بيانات تسجيلات الآبار وتحاليل العينات اللبية، والمثال الثاني لعدد من خرائط السمك والسحنة الصخرية للخزان داخل القالب الشبكي المستخدم.

وبالطبع فإنه يصعب في مرحلة الاستكشاف والتقييم بناء نموذج يعتد به للخزان الجوفي نظراً لندرة وافتقار المعطيات المطلوبة لهذا الغرض، أما في مراحل التخطيط لتنمية الحقول وحيث يكون قد توافر العديد من المعطيات والبيانات فإن بناء هذا النموذج يكون ممكناً بل أصبح ضرورياً وذلك للإجابة عن التساؤلات ذات الأهمية البالغة في إدارة الخزانات وتعظيم الإنتاجية والتي تتركز أساساً على ما يلي:



شكل ٢٦-٨: مضاهاة الوحدات الخزانية وتحديد جودتها في الآبار المحفورة.



شكل ٢٦-٩: بعض الأمثلة للدراسات والخرائط اللازمة لمحاكاة الخزان.

- معرفة أنسب آلية للدفع داخل الخزان المنتج.
- العدد الأمثل للآبار الإنتاجية وابار الحقن.
- تقدير عاملي الإزاحة والاستخلاص.
- التنبؤات الإنتاجية والعمر الاقتصادى للحقل.
- السياسة المطلوبة للإدارة الرشيدة للخزانات وتعظيم المعدلات الإنتاجية.

الفصل السابع والعشرون
طرق الاستخلاص المحسن

لمحة تعريفية:

في الأصل أن يتم إنتاج الحقول بصورة طبيعية بواسطة إحدى آليات الدفع داخل الخزان الجوفي والتي تحدثنا عنها سابقاً، وتعرف هذه العملية بالاستخلاص الأولي primary recovery والتي تقدر في المتوسط بين ٣٠-٣٥٪ من إجمالي المخزون الأصلي من الزيت في باطن الأرض، وربما تدنت هذه النسبة لتصل إلى نحو ٥٪ في بعض الأحوال، وبالطبع فإن ما يترك في داخل الخزان المنتج من كميات الزيت ليس بالأمر الهين فهو يمثل نحو ثلثي المخزون الأصلي ويشكل بالتالي خسارة مادية كبيرة إذا لم يتم استنزافها، ولهذا السبب كان لا بد من استخلاص أكبر قدر منها بوسائل اصطناعية شاع منها الإغراق بالماء water flood والحقن بالغاز gas injection داخل الآبار المنتجة والتي استهدفت في بادئ الأمر المحافظة على الضغط في خزان الزيت، وعرفت بالاستخلاص الثانوي secondary recovery، وفي الأيام الأولى لهذه العملية كان حقن الماء أو الغاز لا يجري إلا بعد بلوغ مرحلة متأخرة من الاستنزاف لكنه ومع الإدراك المتزايد لفوائد المحافظة على الضغط في خزان الزيت أخذت هذه العمليات تطبق مبكراً في حياة الحقل كاستخلاص معزز enhanced recovery، وفي السنوات الأخيرة ظهرت أساليب جديدة تعرف بالاستخلاص الثلاثي tertiary recovery والتي يستخدم فيها الإغراق الكيميائي والاستخلاص الحراري والحقن بالسوائل الخليطة وغيرها، وجميع هذه الطرق يطلق عليها حالياً طرق الاستخلاص المحسن improved recovery methods، وهدفها الأساسي هو الحصول على المزيد من الهيدروكربونات الكائنة في باطن الأرض.

أما بالنسبة للغاز الطبيعي فإنه يمكن عادة استخلاص حوالي ٨٠٪ من المخزون الأصلي وربما أكثر بواسطة الاستخلاص الأولي، ونظراً لأن ما يتبقى من غاز في باطن الأرض بعد استنزاف الحقل بهذا القدر الكبير فإن حقول الغاز يتم هجرها بعد استخلاصها دون الحاجة إلى الأساليب المعززة.

اسس الاستخلاص:

تتوقف كميات الزيت الواردة من الاستخلاص المحسن على الأمور الرئيسة الثلاثة الآتية:

- **حجم المخزون الأصلي من الزيت:**

وهو أن تكون كمية الزيت داخل الخزان متوافرة بدرجة تبرر استخدام أي من أساليب الاستخلاص خاصة وأن هذه التقنيات مكلفة للغاية ولا بد أن يكون العائد من ورائها اقتصادياً.

- **فعالية الاكتساح:**

تعرف فعالية الاكتساح sweep efficiency بأنها النسبة بين حجم المسام الصخرية التي طالها المائع المحقون داخل الخزان الجوفي والحجم الكلي للمسام على المستويين المساحي والرأسي. ولتحديد هذه الفعالية تلعب نسبة الحركية (التنقلية) mobility ratio دوراً كبيراً، وحركية المائع هي دالة من النفاذية واللزوجة حسب المعادلة التالية:

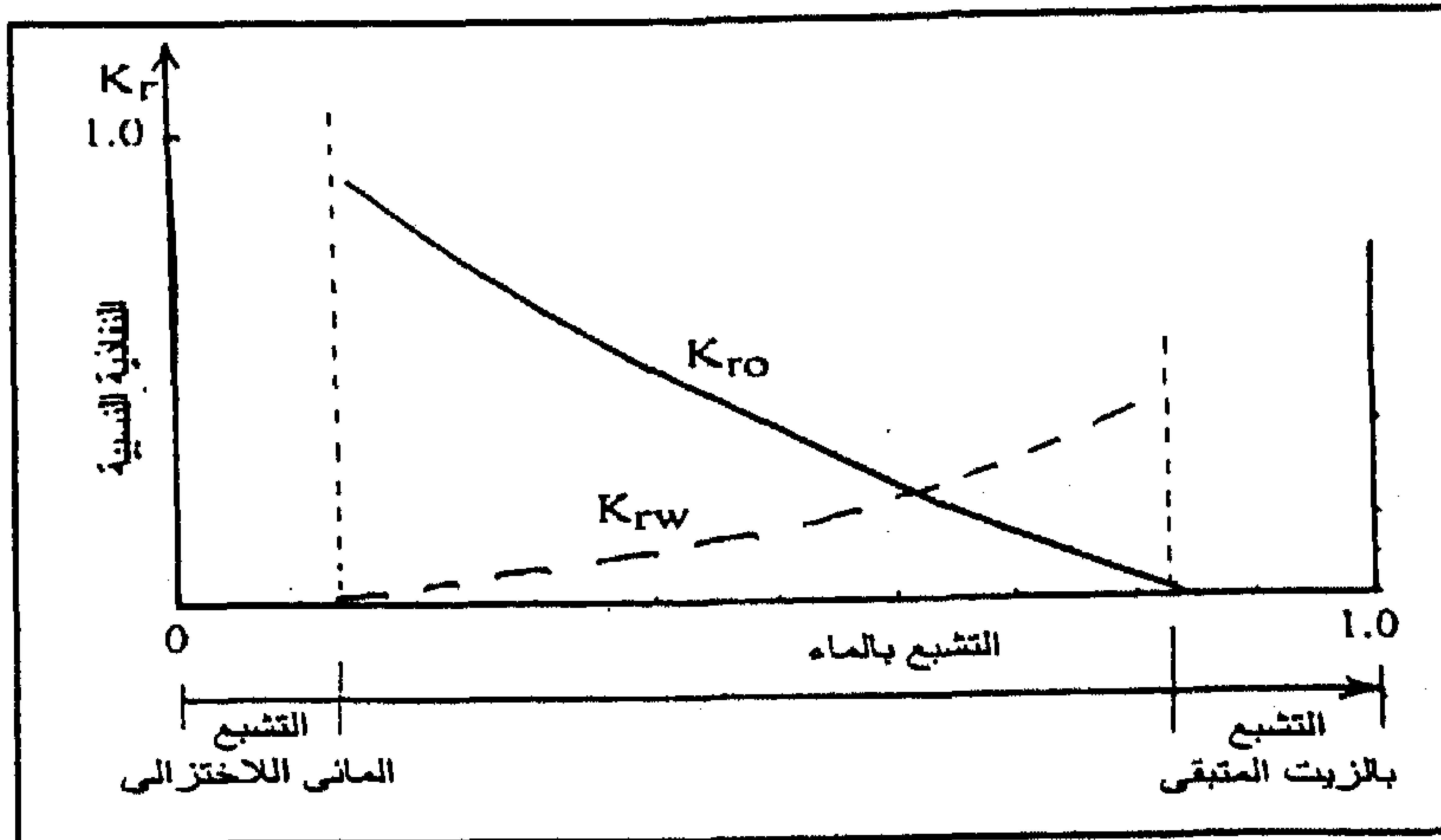
$$\text{(الحركية)}\,\text{mobility} = \frac{K_{abs}\,.K_r}{\mu}$$

حيث إن K_{abs} وK_r هما على الترتيب النفاذية المطلقة والنفاذية النسبية وμ هي اللزوجة

أما نسبة الحركية (M) بين الماء والزيت فيمكن صياغتها على النحو التالي:

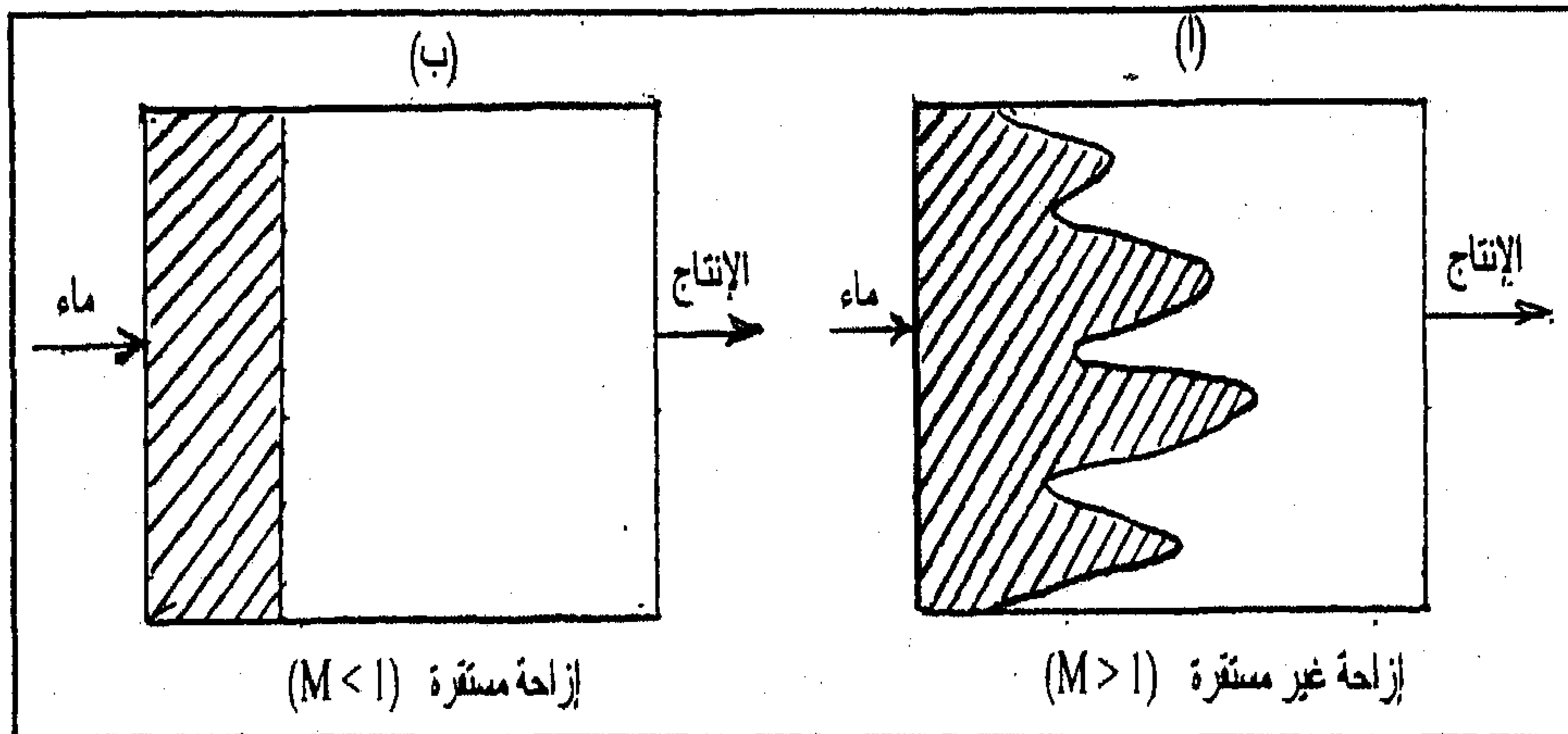
$$\text{(نسبة الحركية)}\,\text{mobility ratio (M)} = \frac{K_{rw}/\mu_w}{K_{ro}/\mu_o}$$

حيث إن K_{rw} وK_{ro} هما النفاذية النسبية للماء والنفاذية النسبية للزيت و μ_w و μ_o هما لزوجة الماء ولزوجة الزيت على الترتيب. ويوضح الشكل ٢٧-١ علاقة النفاذية النسبية لكل من الماء والزيت بمعامل التشبع بالماء حيث تزداد النفاذية للماء مع زيادة التشبع بالماء.



شكل ٢٧-١: علاقة النفاذية النسبية ومعامل التشبع بالماء والزيت.

فإذا كانت نسبة الحركية أكبر من الوحدة (M>1)، فهي تعنى أن للماء ميلاً للتحرك أسرع من الزيت وبالتالي أن يخترق بسرعة النُّطُق ذات النفاذية العالية على هيئة أصابع متخطياً بذلك الكثير من الزيت الموجود داخل الخزان الجوفي (شكل ٢٧-٢أ)، وتسمى الإزاحة في هذه الحالة الإزاحة غير المستقرة unstable displacement، أما إذا كانت M أقل من الوحدة (M<1) تكون الإزاحة مستقرة stable displacement (شكل ٢٧-٢ب) وعلى الأغلب ألا يكون المائع المحقون قادراً على تجاوز المائع الآخر.



شكل ٢٧-٢: الإزاحة غير المستقرة والإزاحة المستقرة للموائع بداخل الخزان الجوفي.

- **فعالية الإزاحة:**

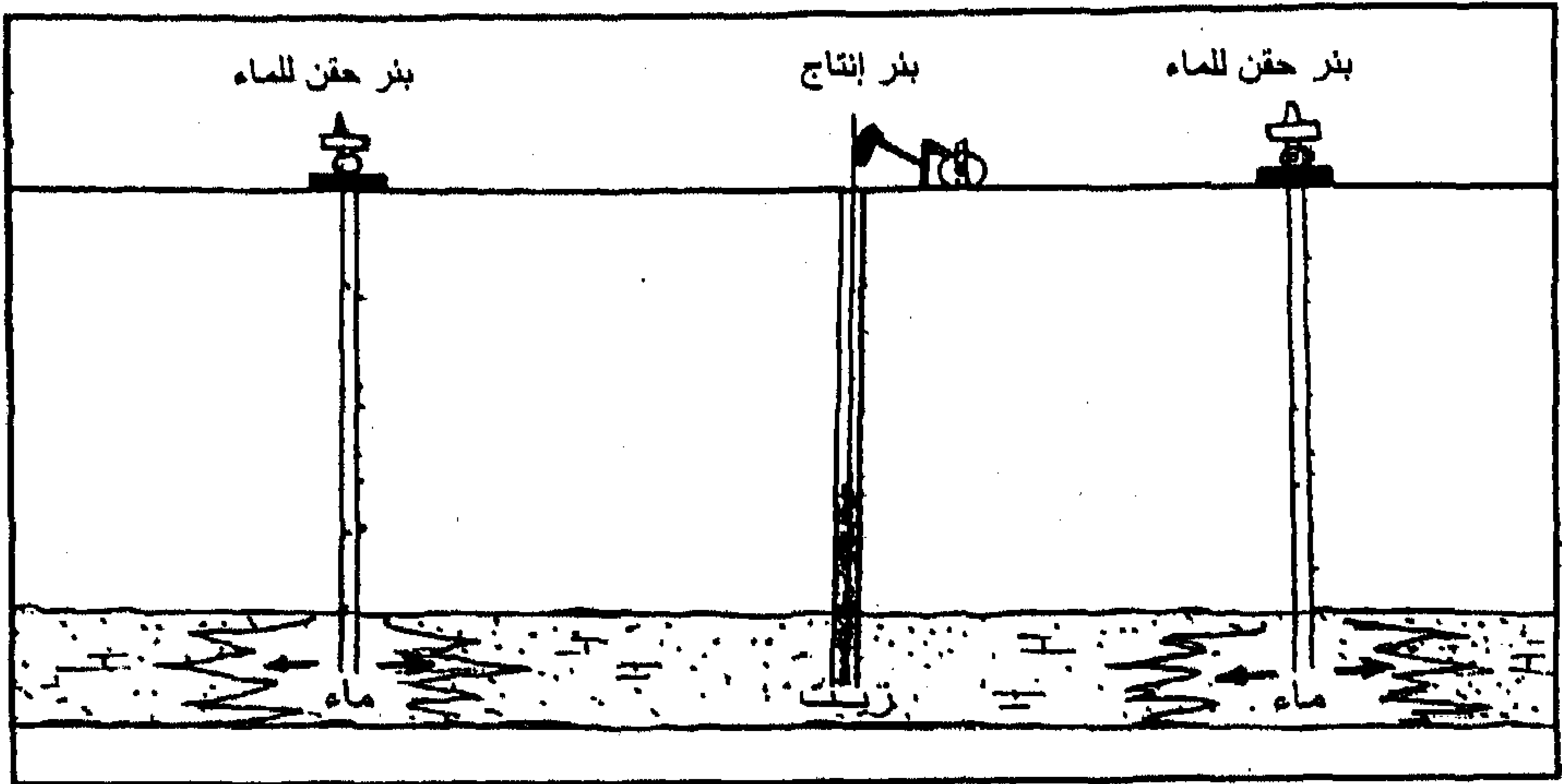
وتعرف فعالية الإزاحة displacement efficiency بأنها النسبة بين حجم الزيت المزاح وحجم المخزون الأصلي من الزيت، ومن العوامل التي تساعد على تحرك الزيت داخل الخزان المنتج ما يلي:

- زيادة حركية الزيت بالنسبة للماء، ويمكن أن يتحقق ذلك عن طريق زيادة لزوجة الماء أو خفض لزوجة الزيت.
- رفع حركية الزيت خلال أعناق المسام pore throats ويمكن أن يتم ذلك بتغيير التوتر السطحي عند هذه الأعناق أو تغيير القابلية للبلل wettability أو النفاذية النسبية relative permeability للموائع المستخدمة، وهي مبادئ بنيت على أساسها طرق الاستخلاص المختلفة كما سنرى لاحقاً.

أساليب الاستخلاص:

- **الإغراق بالماء (الفيضنة):**

تقوم طريقة الإغراق بالماء water flood على حقن الماء في التكوين الجوفي تحت الضغط عبر آبار للحقن injection wells مما يؤدي إلى تزحزح الزيت نحو الآبار المنتجة المجاورة (شكل ٢٧-٣)، وقد تتم عملية الحقن قبل أو بعد أن يكون التكوين قد نضب، ويمكن عن طريق الفيضنة استخلاص ما بين ٥٪ وحتى ٥٠٪ من حجم المخزون المتبقي من الزيت، وفي أغلب الأحوال يتم جلب ماء الحقن من الفواصل (الفرازات) التي تحتوى على كميات المياه التي تم فرزها من الزيت المنتج، كما يمكن الحصول على ماء الحقن من مصادر أخرى بعد معالجته كيميائياً، حيث أن الماء المستخدم ينبغي أن يكون متوافقاً مع ماء الخزان الجوفي ولا يتسبب في تفاعلات من شأنها أن تقلل من نفاذية الخزان، فالمواد الصلبة المعلقة مثل كبريتات الباريوم يمكن أن تسد المسام الصخرية ومن ثم ينبغي إزالتها من الماء قبل الحقن، كما أن المواد العضوية والبكتيريا يمكن أيضاً التخلص منها، كما يزال الأكسجين من الماء تجنباً لأي تآكل محتمل، ويمكن أن يحقن الماء تحت ضغط إلى داخل البئر أو أن يتم تصريفه بواسطة الجاذبية من مستودعات التخزين المقامة على ارتفاعات أعلى، ويمكن لآبار الحقن أن تكون قد حفرت خصيصاً لهذا الغرض، أو أنها كانت في السابق آباراً منتجة وتم تحويلها إلى آبار للحقن بعد نضوبها.

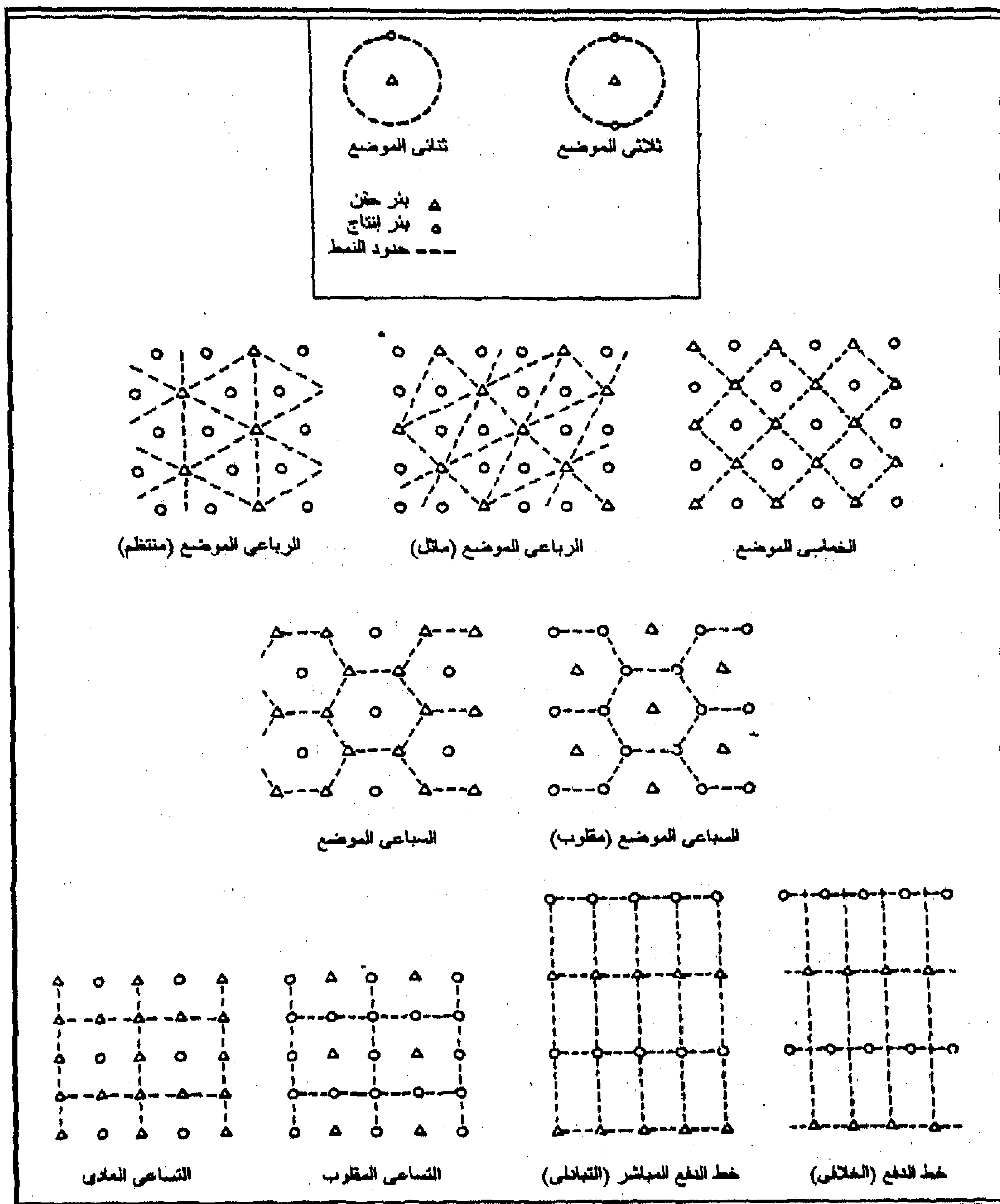


شكل ٢٧-٣: الإغراق بالماء (الفيضنة).

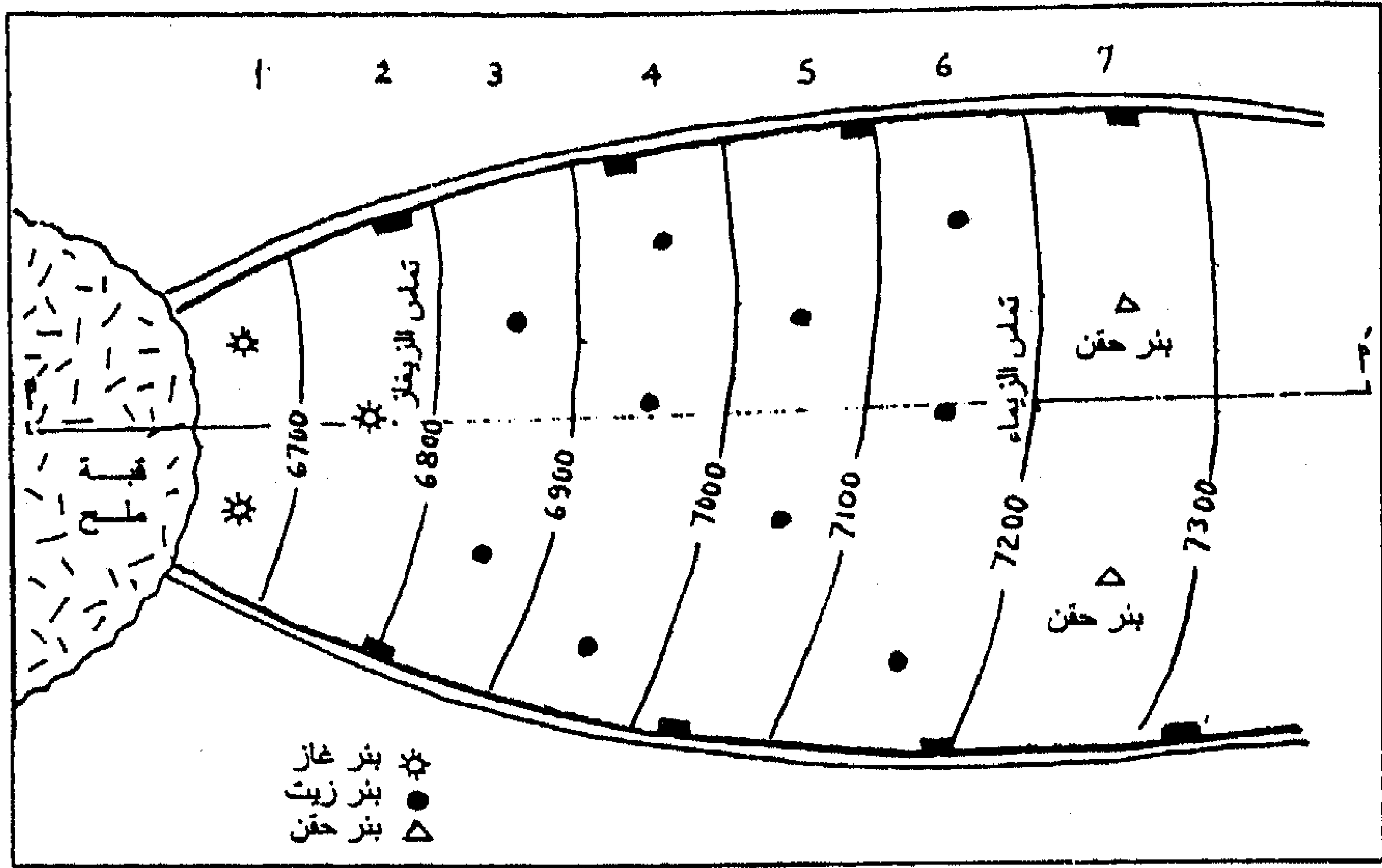
وفي عملية الفيضنة تتخذ آبار الحقن مواقع وخطوطاً معينة بالنسبة للآبار المنتجة، والشائع هو النمط الخماسي five-spot pattern والذي يتكون من أربع آبار للحقن على أركان المربع وبئر إنتاجية في المركز كما هو موضح بالشكل ٢٧-٤، ويمكن أن يتكرر هذا النمط بالحقل على أساس أن أربع آبار للحقن تحيط بكل بئر منتجة وأربع آبار منتجة تحيط بكل بئر للحقن. وبالإضافة إلى هذا النمط هناك النمط السباعي seven-spot pattern حيث توجد ست آبار للحقن محاطة ببئر إنتاجية واحدة (شكل ٢٧-٤) أو أن يتخذ ترتيباً مقلوباً inverted بمعنى وجود ست آبار إنتاجية تحيط ببئر حقن واحدة، هذا ويمكن أن يكون النمط على هيئة خطوط لآبار الحقن والأخرى للآبار الإنتاجية كما هو موضح بنفس الشكل سواء كانت في وضع تبادلي alternating أو خلافي staggered.

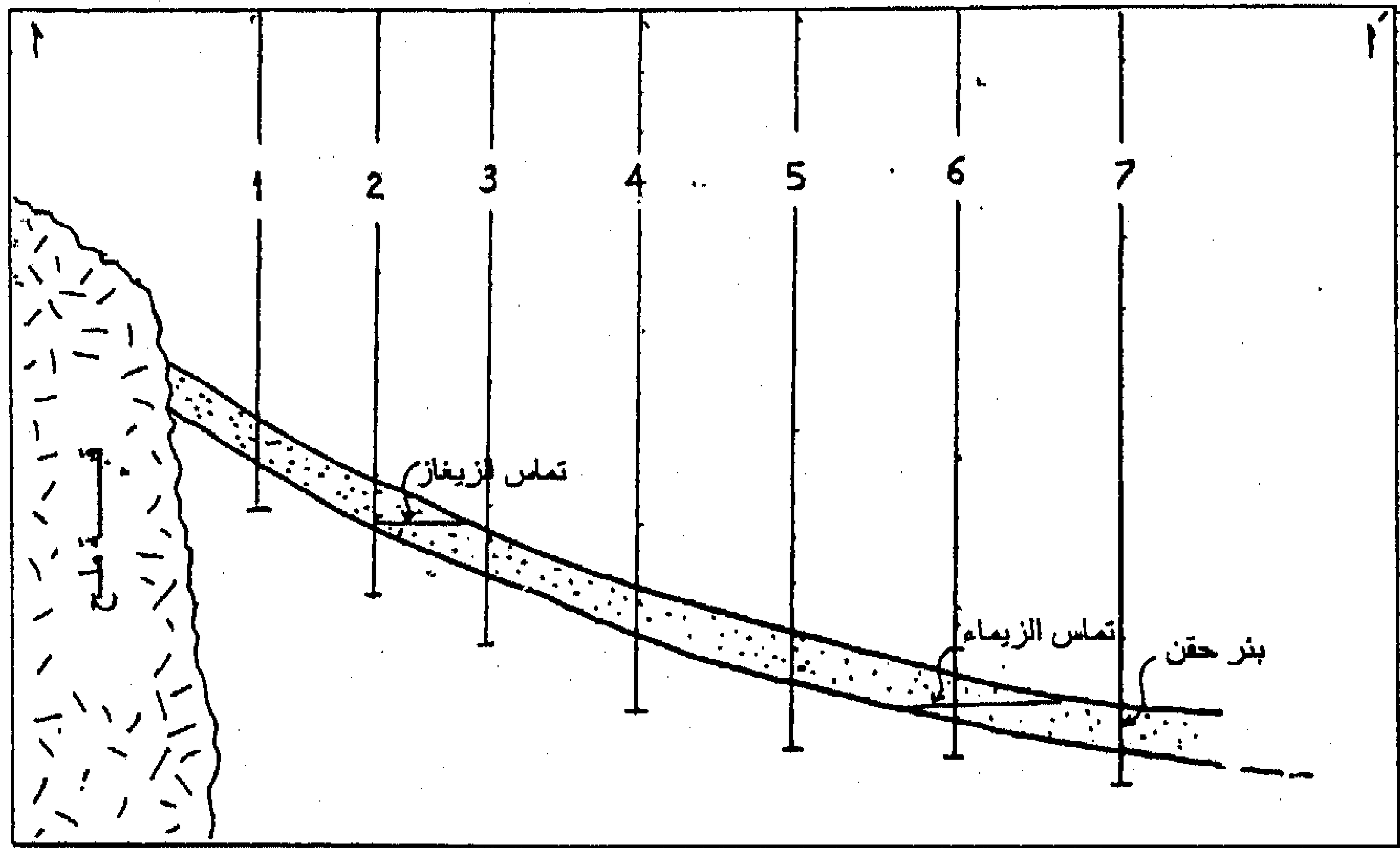
وتعتبر هيئة الخزان الجوفي وعمقه وتكلفة المشروع من العوامل المهمة في تحديد نظام نمط الحقن في عمليات الإغراق بالماء، وعلى سبيل المثال في الخزانات الرفيعة السمك وذات الميول الشديدة تكون مواقع آبار الحقن بالقرب من تماس الزيماء الأصلي وتكون الآبار المنتجة أعلى الميل (شكل ٢٧-٥) ومع تحرك جبهة الزيماء مع الإنتاج تتعرض الآبار المنتجة إلى اجتياح المياه المحقونة وتتأثر الآبار التي بالصف السادس من هذا الشكل للاجتياح أولاً تليها باطراد آبار الصفوف ٣ و٤ و٥، وعلى غير ذلك قد يحدث في حالة الخزانات غير المتجانسة والرديئة أن تطول المياه في البداية الآبار المنتجة والواقعة أعلى الميل على غير ما هو متوقع وذلك بسبب ظاهرة الاجتياح العارم breakthrough خلال النُّطُق

ذات النفاذية العالية وتلك أوضاع غير مرغوبة حيث إن المياه تتجاوز كميات الزيت تاركة وراءها مساحات معزولة bypassed، وإذا ما أمكن تحديد المسارات الأصبعية للمياه الجارفة فقد يتم تعديل أنماط مواقع الآبار لاحتواء هذه الظاهرة، أما بالنسبة للخزانات المنبسطة والسميكة فإن تقدم جبهة الماء يأخذ شكلاً منتظماً ويمكن بالتالي استخدام الأنماط المتعارف عليها والتي سبق شرحها.



شكل ٢٧-٤: أنماط الإغراق بالماء (الفيضنة) المختلفة
ومواضع آبار الحقن بالنسبة لآبار الإنتاج.





شكل ٢٧-٥: خريطة جيولوجية وقطاع جانبي في طبقة شديدة الميل حيث يسود أسلوب الدفع الحافي بالماء، وتكون الآبار على الصفوف من ٦ إلى ٥ إلى ٤ هي الأولى في التعرض والتأثر باجتياح الماء المحقون داخلها.

ومن مشروعات الإغراق بالماء الناجحة ذلك الذي تم إنجازه في حقل انتصار A الليبي الذي يقع في حوض سرت Sirte Basin والغني باحتياطياته البترولية الضخمة، وكان اكتشاف هذا الحقل عام ١٩٦٧ عندما اخترقت البئر الاستكشافية A1-103، بناء

على نتائج المسح السيزمي، تجمعاً كبيراً للزيت في الصخور الكربوناتية من عصر الباليوسين العلوي عند عمق ٢٨٧١ متراً (٩٤١٧ قدماً) والمتواجد في مصيدة من الشعاب المرجانية بيضاوية الشكل (راجع الشكل ٨-٢٠) يمتد قطرها الأقصى إلى نحو ٥ كيلومترات ويبلغ أقصى عمود للزيت بها نحو ٣٠٠ متر (١٠٠٢ قدم)، وقد وجد أن صخر الخزان الجوفي جيد من حيث طبيعته ومتجانس إلى حد كبير في خصائصه البتروفيزيائية حيث تبلغ مساميته في المتوسط ٢٠٪ ونفاذيته ٢٦ ملي دارسي بالإضافة إلى الخواص الخزانية الأخرى كما هو موضح بالجدول الآتي:

جدول ٢٧-١ : خواص خزان انتصار الشعابي.

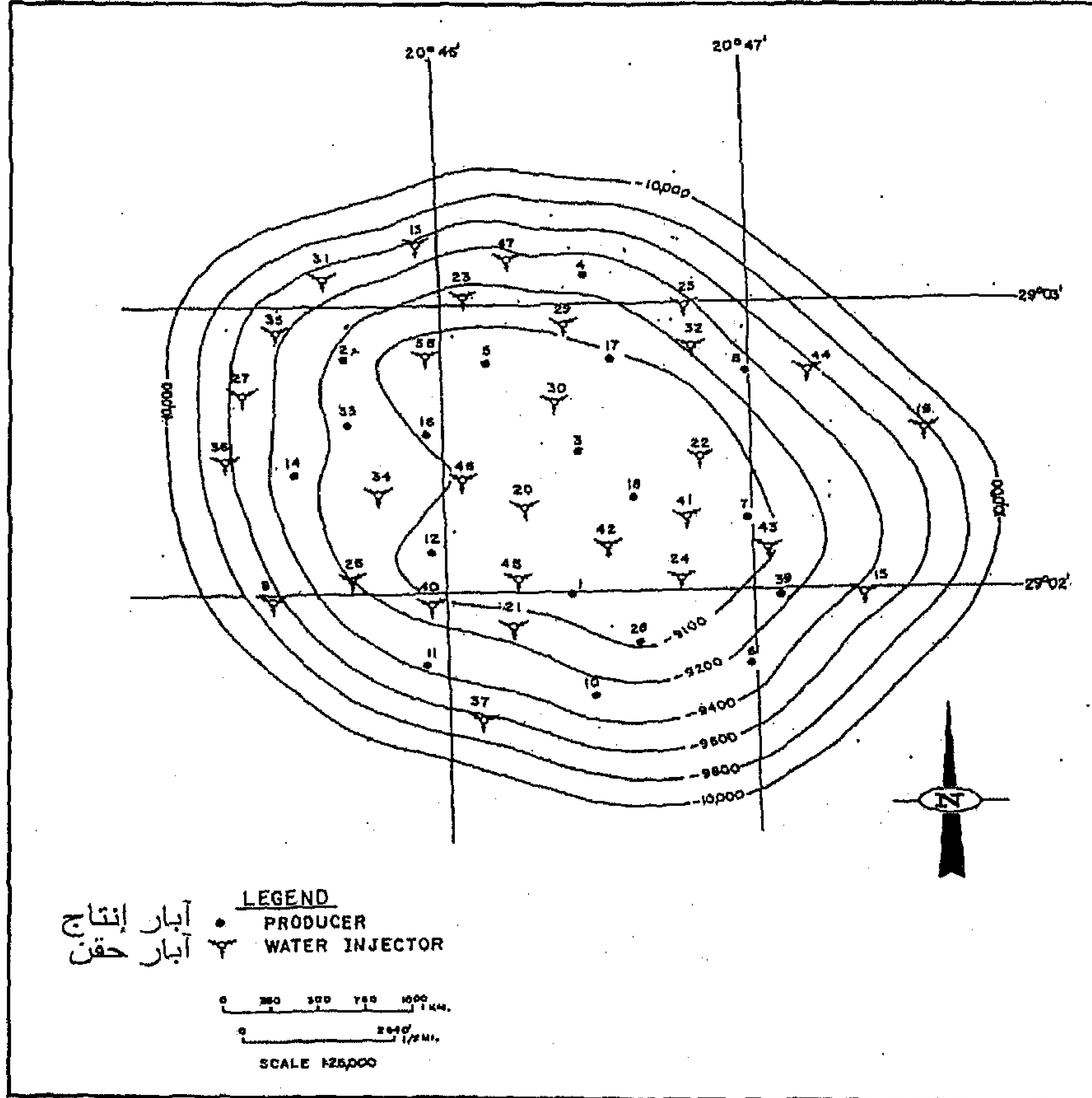
النفاذية الأفقية	٢٦ ملي دارسي	الضغط الأصلي للخزان	٤٥٣٢ رطلاً على البوصة المربعة
المسامية المتوسطة	٢٠٪	ضغط التشبع	٣٢٤٠ رطلاً على البوصة المربعة
التشبع بالماء	١٢٪	نسبة الغاز إلى الزيت	١٣٣٦ قدماً مكعبة/ برميل
جودة الزيت	٥٤ درجة	العامل الحجمي للزيت	١٫٠٨١ برميل/ برميل
لزوجة الزيت	٠٫١٥ سنتي بواس	درجة حرارة الخزان	٢٣٧ درجة فهرنهيت

وقد أعطت نتائج الاختبارات في بئر الكشف معدلاً بلغ ٤٤٨٧٠ برميلاً في اليوم، كما قدر حجم المخزون الأصلي من الزيت بأكثر من ٣ بلايين برميل.

ولما كان الزيت بالخزان في حالة تحت التشبع فمن المتوقع أن تكون كفاءة الاستخلاص الأولى لهذا الزيت منخفضة نوعاً، ونظراً لوجود طبقة خازنة للماء تحت الخزان البترولي الشعابي وهي طبقة حيرة الكربوناتية Heira Carbonate ذات سمك ٦١٠ أمتار ومسامية ١٠٪ ونفاذية ١٥ ملي دارسي، ولكي يمكن الحصول على استخلاص كبير للزيت (٦٠٪ من المخزون الأصلي) فقد رؤي أن الإغراق بالماء هو أفضل وسيلة لتحقيق الهدف، ولهذا الغرض تم إكمال ١٨ بئراً انتاجية و٢٩ بئراً لحقن الماء و٣٠ بئراً للإمداد بالمياه اللازمة للفيضنة (شكل ٢٧-٦) بمعدلات بين ٢٠٠٫٠٠٠ برميل في اليوم لتتجاوز الـ ٥٠٠٫٠٠٠ برميل في مطلع عام ١٩٧٠، وحيث كانت النتائج مرضية للغاية وتوافقت مع التنبؤات التي قدمتها دراسات المحاكاة للخزان المنتج بذلك الحقل العملاق.

الحقن بالغاز:

تقوم هذه الطريقة على حقن غاز gas injection خامل داخل الخزان ليعمل هذا الغاز على إذابة الزيت بالخزان، ويمكن إستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون أو النيتروجين أو الغاز الطبيعي المسال (LPG)، ويشترط في الغاز المحقون ألا يكون أكّالاً للمعدات والتجهيزات البئرية وألا يكون مكلفاً من الناحية المالية. وعند استخدام ثاني أكسيد الكربون فإنه يجلب في العادة بواسطة خط الأنابيب أو أن يعبأ وينقل بالشاحنات إلى الموقع.

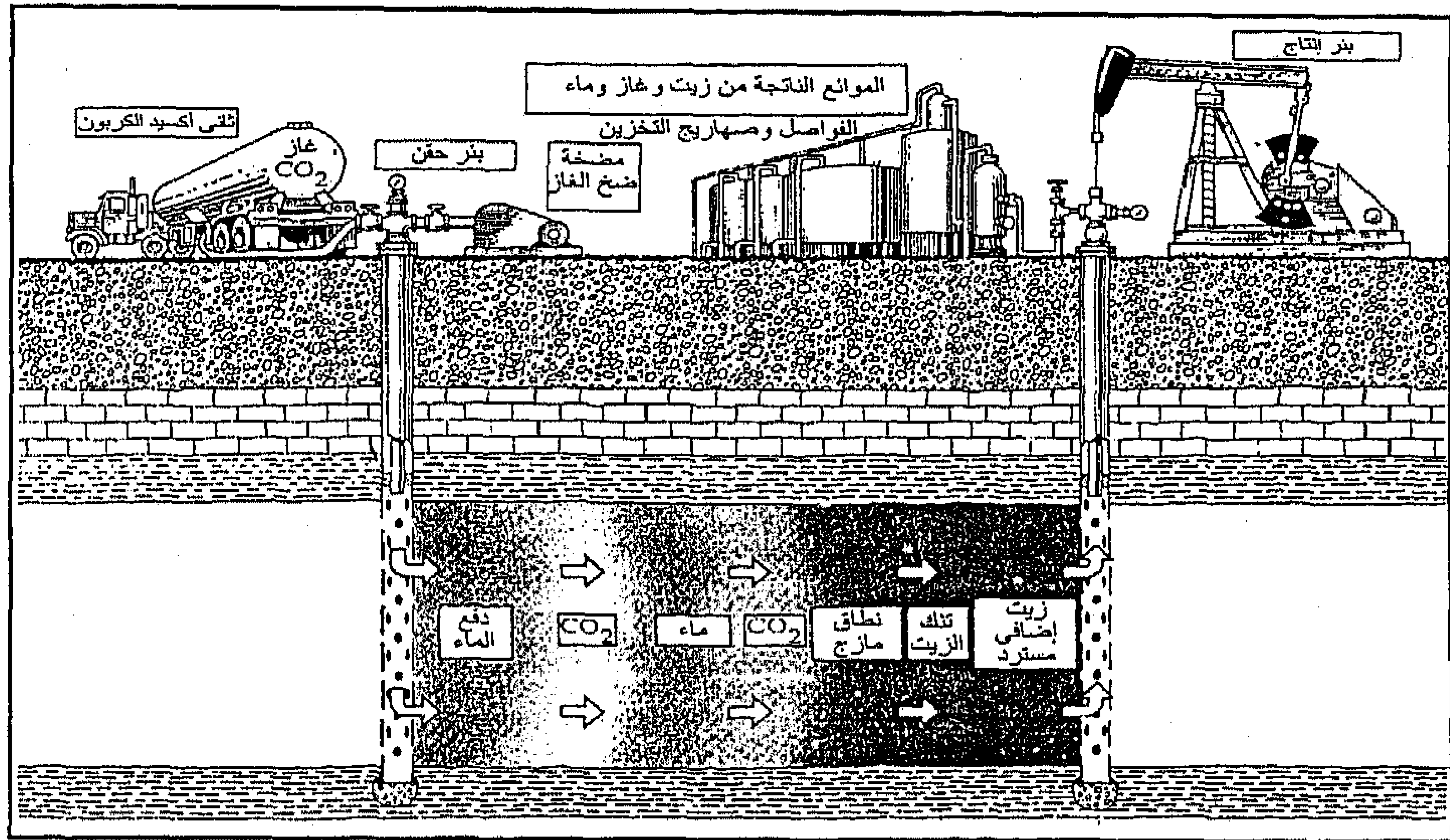


شكل ٢٧-٦: خريطة تركيبية في حقل انتصار A بحوض سرت (ليبيا) وتوضح أيضاً مواقع آبار الإنتاج وآبار الحقن.

ويتولد غاز ثاني أكسيد الكربون في الطبيعة بفعل الأحماض على المواد الكربوناتية والبيكربوناتية في الصخور النارية والرسوبية والمتحولة، أو بأكسدة الهيدروكربونات عند

ملامستها للمياه المتمعدنة، أو بتسخين الكربونات والبيكربونات، أو بفعل أنواع معينة من البكتيريا اللاهوائية عند مهاجمتها للهيدروكربونات، ويوجد الغاز الطبيعي الغني بثاني أكسيد الكربون في عدة مناطق بالعالم ومن أشهرها تلك الواقعة في غرب الولايات المتحدة مثل مونتانا وكولورادو ويوتا ونيومكسيكو وكاليفورنيا، وفي نيومكسيكو بلغت نسبة ثاني أكسيد الكربون في الغاز الطبيعي نحو ٩٩٪، كما وصلت الطاقة الإنتاجية لعدد من الآبار هناك إلى معدلات يومية تراوحت بين ١٢ و٢٦ مليون قدم مكعبة.

وعند حقن ثاني أكسيد الكربون في الخزان الجوفي (شكل ٢٧-٧) فإنه يمتزج مع الزيت ويسهل بالتالي حركة الزيت بالخزان ويدفعه إلى داخل البئر المنتجة، وغالباً ما تصل نسبة الاستخلاص إلى حوالي ٣٥٪ من المخزون المتبقي من الزيت، وبسبب اللزوجة المنخفضة للغاية لثاني أكسيد الكربون فإن اندفاعه داخل الخزان الجوفي يكون كبيراً مما ينتج عنه تجاوز لكميات كبيرة من الزيت دون استخلاصها، ولتجنب ذلك تحقن بالتبادل كميات من الماء والغاز في عملية تعرف بتبادل الماء والغاز water-alternating gas process، وبالنسبة للغاز الطبيعي المسال فهو أيضاً يمتزج مع الزيت ويعمل أيضاً كقوة دافعة لتحريك الزيت داخل الخزان، كما يمكن في بعض الأحيان استخدام النيتروجين كغاز حقن إذا ما دعت الحاجة إلى ذلك.

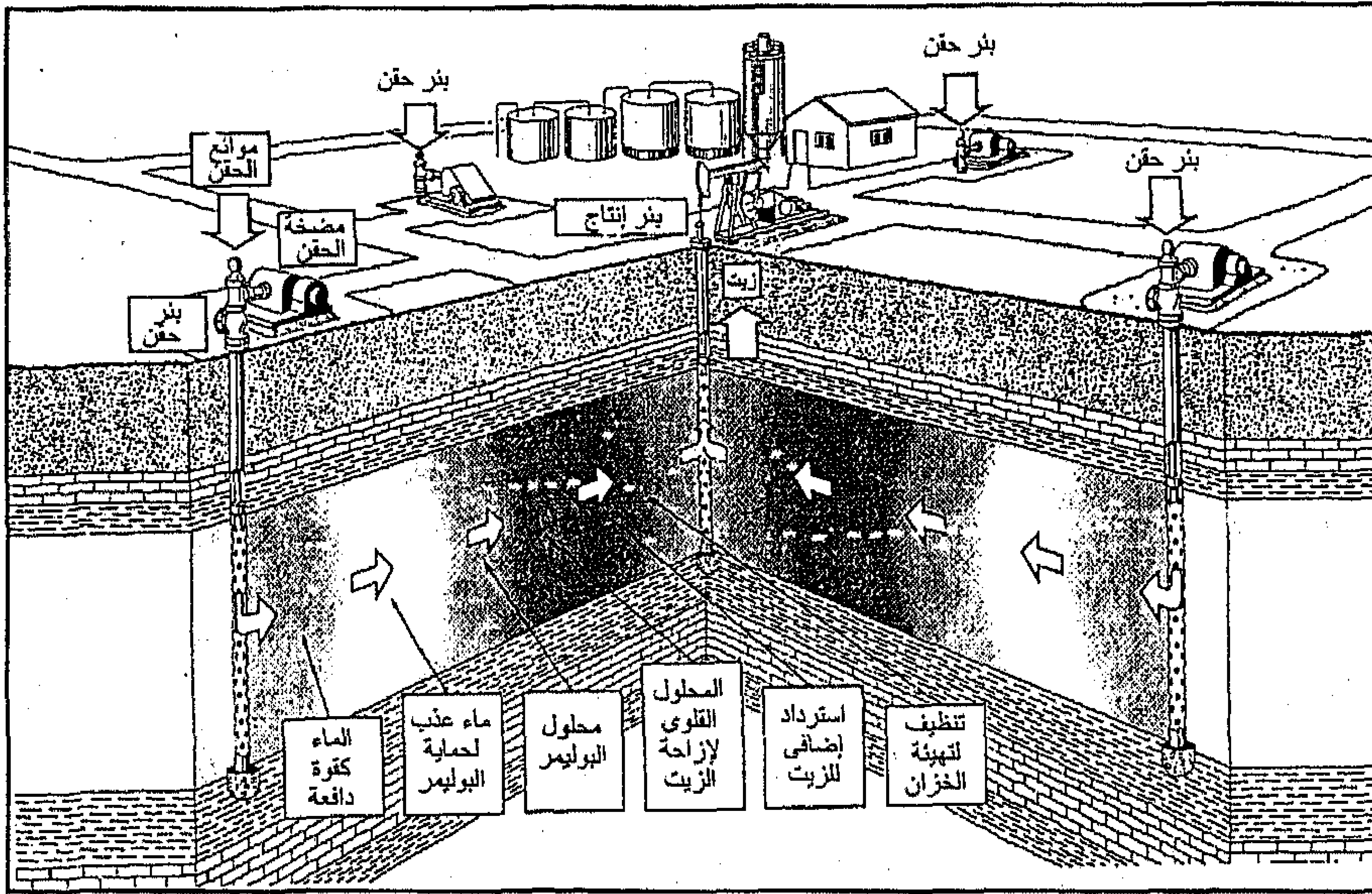


شكل ٢٧-٧: رسم تخطيطي لعملية الحقن بغاز ثاني أكسيد الكربون الذي يعمل على خفض لزوجة الزيت داخل الخزان ودفعه إلى بئر الإنتاج.

الاستخلاص الكيميائي:

في الاستخلاص الكيميائي chemical flood يتم حقن موائع مختلفة داخل الخزان الناضب على هيئة دفعات منفصلة slugs، ولكل مائع هدفه الخاص وجميع الموائع تتحرك كجبهات fronts منفردة من آبار الحقن إلى داخل الخزان تجاه البئر المنتجة.

وفي الغمر بالمواد الغروية والبولميرات micellar-polymer، تحقن في البداية دفعة من ماء الخزان الجوفي لتهيئة الخزان وتشكيل جبهة أمام المواد الكيميائية المحقونة تليها دفعة أخرى من المحاليل الخافضة للتوتر السطحي surfactants مثل الصابون والرغويات حيث تعمل كمادة منظفة detergant من شأنها خفض التوتر السطحي بين الماء والزيت وبالتالي تخليص الزيت من المسام الصخرية، كما يعمل البوليمر المحقون كقوة دافعة لخافضات التوتر وكذا تكسير المستحلبات الزيتية ودفعها إلى الأمام داخل الخزان ومنها إلى داخل البئر المنتجة (شكل ٢٧-٨).



شكل ٢٧-٨: رسم تخطيطي لعملية الإغراق الكيميائي.

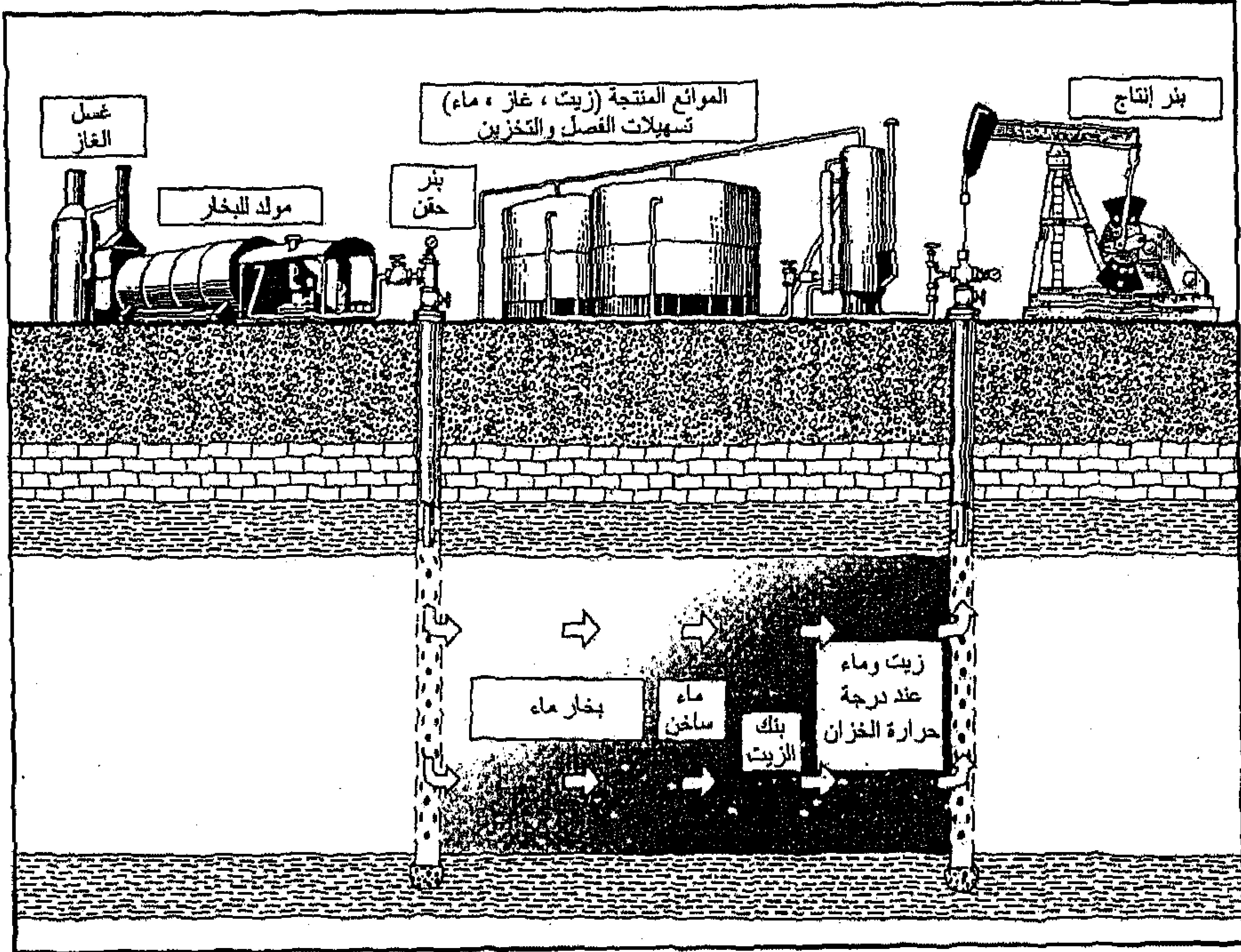
وعادة ما يقتصر استخدام الإغراق الكيميائي على خزانات الحجر الرملي لأن الحجر الجيري يعمل على امتصاص المواد الخافضة للتوتر السطحي، ويمكن استخلاص ما يقرب من ٤٠٪ من الزيت المتبقي داخل الخزان، علماً بأن هذه الطريقة ذات تكلفة عالية

وفي بعض الأحيان تستخدم الصودا الكاوية caustic soda من أجل رفع الرقم الهيدروجيني pH في الخزان وخلق مادة خافضة للتوتر تساعد على تحريك الزيت خلال مسام الصخر الخزان، وتعتبر طريقة الحقن بالصودا الكاوية ذات فاعلية خاصة بالنسبة للزيوت الخام الحامضية وذات الكثافة العالية والجيدة الجودة.

الاستخلاص الحراري:

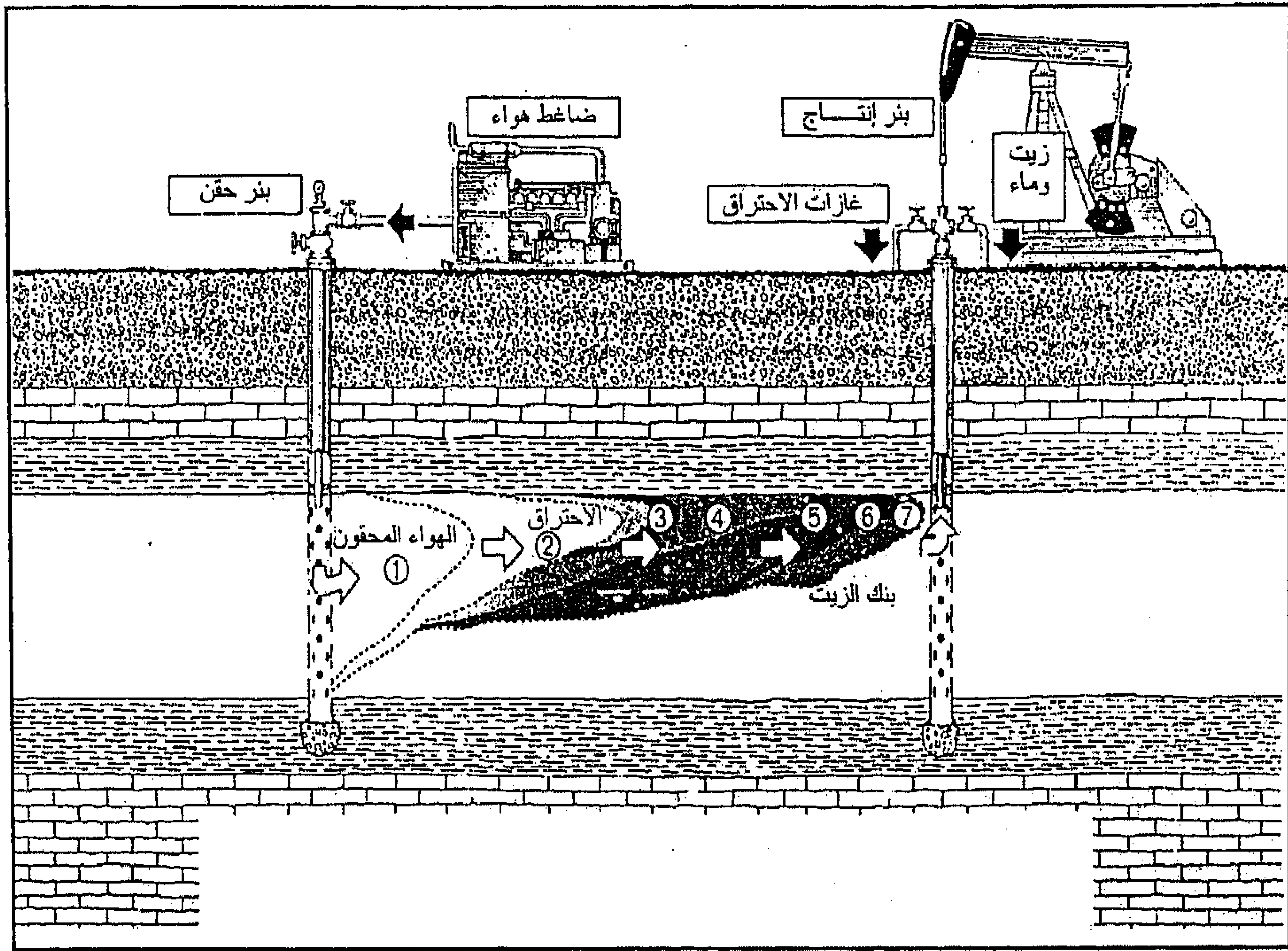
تقوم طريقة الاستخلاص الحراري thermal recovery على استخلاص الزيت من الخزان الجوفي عن طريق التسخين حيث يعمل ذلك على تخفيف لزوجة الزيت الثقيل (أقل من 20°) وبالتالي تسهيل حركته إلى داخل البئر، ومن بين الأساليب الحرارية طريقة الحقن الدوري بالبخار cyclic steam injection وهي ما تسمى أيضاً بطريقة النفخة والهبة huff and puff حيث تكون آبار الحقن هي نفسها آبار الانتاج بالتبادل وتستخدم الطريقة آباراً فردية لضخ البخار إلى داخل الخزان المحتوي على الزيت الثقيل لفترة زمنية قد تصل إلى أسبوعين حيث يتم غلق البئر بعد ذلك لعدة أيام حتى يتمكن البخار من تسخين الزيت الثقيل وزيادة حركيته بداخل الخزان، ومن نفس الآبار يتم سحب الزيت بواسطة مضخات الصكرود لفترة زمنية، وتتبادل فترتا الحقن والسحب لعدة دورات حتى تصبح العملية غير مجدية ويتوقف استخلاص الزيت، وهناك أسلوب حراري آخر وهو ما يعرف بطريقة الفيضنة أو الإغراق بالبخار steam flood حيث تستخدم آبار للحقن وأخرى للإنتاج (شكل ٢٧-٩)، وفي آبار الحقن يتم ضخ بخار الماء المحمي superheated steam إلى داخل خزان الزيت الثقيل ومن شأن هذا البخار أن يعمل على تخفيف لزوجة الزيت، وعندما تتناقص درجة الحرارة يبدأ البخار في التكثيف ويصبح ماء ساخناً يعمل كآلية دفع للزيت إلى داخل الآبار الإنتاجية، والجدير بالذكر أن نمط مواقع تباعد الآبار يكون أقصر كثيراً في حالة الفيضنة بالبخار، كما أن نسبة الاستخلاص بالطريقة الجديدة قد تصل ما بين ٢٥ و٦٥٪ من المخزون الأصلي من الزيت، هذا وقد أدت الفيضنة بالبخار إلى نتائج طيبة في عدد من البلدان مثل فنزويلا وكندا والولايات المتحدة حيث أمكن استخلاص أنواع من الزيت الثقيل (١٢- ١٦°) وكانت نسبة الاستخلاص أكثر من ٥٠٪، ويعتبر حقل كيرن ريفر Kern River بكاليفورنيا من المشروعات الناجحة في الاستخلاص الحراري

باستخدام الفيضنة بالبخار، وكان هذا الحقل قد تم اكتشافه بالقرب من تسرب لزيت ثقيل (١٤°) وحيث يبلغ عمق الخزان الجوفي ما بين ١٥٠-٤٠٠ متر (٨٠٠-١٣٠٠ قدم) والذي يتكون من حجر رملي سائب ذي نفاذية عالية تتراوح ما بين دارسي و٥ دارسي ومسامية بين ٢٨ و٣٠٪ وكان حجم الإنتاج الأولي من هذا الخزان حوالي ١٥٪ ولكن مع بدء استخدام الفيضنة بالبخار في أواسط القرن الماضي إرتفع معدل استرداد الزيت إلى نحو ٥٥٪ وذلك بفضل هذه التقنية.



شكل ٢٧-٩: رسم تخطيطي يوضح الاستخلاص الحراري للزيت.

وإضافة إلى فيضنة البخار هناك أيضاً عملية الاحتراق الموضعي in-situ combustion أو ما تعرف كذلك بالفيضنة بالنار fire flood (شكل ٢٧-١٠) وهي طريقة تقوم على حقن الهواء أو الأكسجين داخل الخزان البترولي حيث تتم عملية الاحتراق للزيت والغاز هناك، وتولد الحرارة الناتجة عن احتراق الخزان مدداً من البخار الذي يعمل كقوة دافعة لتحريك ودفع الزيت إلى داخل البئر المنتجة، وبالطبع فإن هذه الطريقة لن تكون مجدية إذا كان حجم الزيت بالخزان غير كاف للحفاظ على الاحتراق.



شكل ٢٧-١٠: رسم تخطيطي للفيضنة بالنار بواسطة عملية الاحتراق الموضعي للزيت حيث تنخفض لزوجة هذا الزيت بالحرارة ويتولد البخار كقوة دافعة لتحريك ودفع الزيت إلى داخل بئر الإنتاج.

وفي الآونة الأخيرة كانت هناك محاولات لاستخدام الطرق الكهرومغناطيسية electromagnetic عن طريق الميكروويف microwaves لما لهذه الموجات من كفاءة تسخينية عالية، لكنها تبدو سطحية ولا تستطيع اختراق التكوين إلا لسنتيمترات محدودة.

الاستخلاص الميكروبي:

لا توجد في الوقت الحالي مشروعات على نطاق واسع بالنسبة لعمليات الاستخلاص الميكروبي microbial EOR، وهناك طريقتان في هذا الشأن وتعتمد الطريقة الأولى منهما على حقن الميكروبات والمغذيات إلى داخل التكوين حيث تعمل الميكروبات على تحلل الزيت وإنتاج مواد منظفة وثاني أكسيد الكربون وخلايا جديدة يمكنها استخلاص الزيت من الخزان الجوفي، أما الطريقة الثانية فتقوم على أساس ما تسببه الميكروبات والمغذيات المحقونة من انحلال جزئي للزيت تنسد معه المناطق ذات النفاذية الكبيرة في الوقت الذي تنشط فيه المناطق ذات النفاذية الأقل في تحريك الزيت بداخلها اختيارياً.

نمذجة الخزانات للاستخلاص المحسن:

عند إقرار أي من طرق الاستخلاص الآنفة الذكر عادة ما يقوم مهندسو الخزانات بوضع وتطوير برامج الحاسب الآلي لنمذجة الخزانات المستهدفة، وفي هذا الصدد لا بد أن تؤخذ النقاط الآتية في الحسبان:

- هندسة الخزان الجوفي من حيث بنيانه وهيكله الخارجي وكذا التشكيل الداخلي له والمرتبط بالمسامية والنفاذية (رأسية أو أفقية)، النُّطُق ذات النفاذية المنخفضة وتوزيعات التشبع بالماء، وحدات التدفق، اتجاهات وتوزيعات الشقوق إن وجدت.
- مواقع كل من آبار الحقن وآبار الإنتاج.
- المعلومات الخاصة بالضغط والحجم ودرجة الحرارة (PVT) للموائع ذات الاهتمام.
- نوع عملية الاستخلاص المستخدمة.
- معدلات التدفق في الآبار (حقن وإنتاج).

وهناك البعض الذي يحاول تبسيط الأمور وافتراض أن الخزان الجوفي متجانس الخواص وهو أمر غير واقعي في أغلب الأحوال، ولا بد من الرجوع إلى البيانات الواردة من مصادر التقييم التي تحدثنا عنها في السابق مثل تسجيلات الآبار والعينات اللبية والتحاليل البتروجرافية والقياسات المعملية للمسامية والنفاذية حيث تعطي هذه المعلومات تصوراً أقرب كثيراً إلى الواقع عن البيئة الترسيبية والعمليات اللاحقة التي أثرت في خصائص الخزان، ومن هذا المنطلق يمكن بناء النموذج الجيولوجي الملائم، كذلك لا بد من الأخذ في الاعتبار وحدات التدفق داخل الخزان الجوفي والتي على إتصال هيدروليكي فيما بينها وتتمتع بخصائص بتروفيزيائية متشابهة وذات سحنة صخرية واحدة وإن كان ذلك ليس بالضرورة.

وعند بناء النموذج الجيولوجي لدينا مدخلات إلى ذلك، فهناك النموذج الحاسم deterministic model الذي يبني على أفضل التفسيرات من خلال البيانات المتوافرة من

تسجيلات الآبار والعينات اللبية والبيانات السيزمية، والنموذج الترجيحي probalistic (stochastic) الذي يبني في المقام الأول على نظرية الاحتمالات والإحصاءات الرياضية وهو نموذج تنبؤ للأداء المستقبلي للخزان الجوفي، كذلك فإن مفهوم تميز الخزانات reservoir characterization وتشخيص النقاط الفارقة ووحدات التدفق بداخلها هي من الأمور الأساسية عند وضع التصاميم الخاصة بعمليات الإستخلاص المحسن وحيث يكون المدخل الجيولوجي أحد الأركان المهمة للغاية بعد تكامله مع المدخلات الهندسية والإحصائية الأخرى.

الفصل الثامن والعشرون
التخطيط وإدارة المشروعات والعقود

تمهيد:

تتسم المشروعات البترولية petroleum projects بضخامتها وتعقيداتها من الناحيتين المالية والفنية، كما أن تخطيط المشروعات project planning لا يتم بين عشية وضحاها، فهو جهد يتوزع على عدد من المراحل الفنية والزمنية وتستهدف كل مرحلة الوصول إلى منتج يتمتع بالمواصفات المتفق عليها، ونظرا لضخامة تلك المشروعات وتشعب طبيعتها تلجأ الشركات العاملة إلى الاستعانة بالمقاولين لأداء المهام المنوطة بهم، لما يتمتعون به من خبرة ودراية في مجالات تخصصاتهم، ولقد شاهدنا في السابق كيف أن حفر بئر للبترول احتاج إلى دراسة مستفيضة وإعداد جيد والاستعانة بالشركات الخدمية service companies المختلفة لإنجاز المهمة بنجاح وفي التوقيت المحدد لها، وكل ذلك كان من خلال مراحل متعددة وذات سمات محددة وتكاليف مقررة، ولنبدأ الآن في شرح المفاهيم الخاصة بالمشروعات ومراحلها المختلفة وما يتعلق بإدارتها.

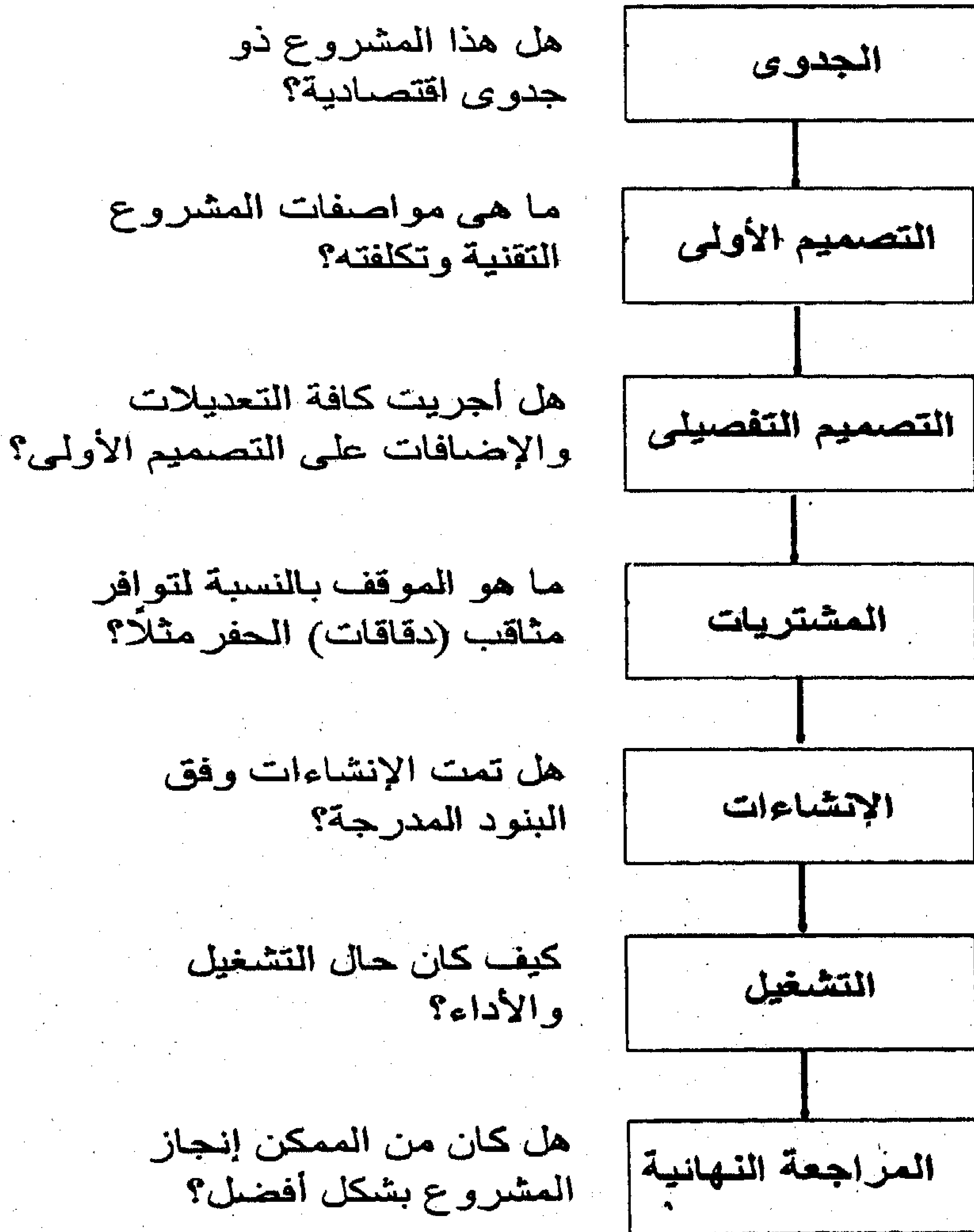
مرحلية المشروعات وتنظيمها:

يمكن تعريف المشروع بأنه " مهمة task " مطلوب إنجازها حسب مواصفات محددة وضمن إطار زمني متفق عليه ومقابل تكلفة معينة، وبناء على حجم المشروع تتوقف العمالة اللازمة له، فالمشروع الضخم يتطلب عمالة كبيرة ليس فقط بالنسبة لعددها ولكن أيضا فيما يتعلق بالكفاءة المهنية لهذه العمالة، كما يتطلب المشروع أيضا تقسيمه إلى مراحل phases تنفيذية، ولكل مرحلة احتياجاتها الفنية والمهنية وارتباطاتها المالية، وفي الحالات النموذجية يمكن تقسيم هيكلية المشروع إلى سبع مراحل هي: الجدوى، التصميم الأولي، التصميم التفصيلي، المشتريات، الإنشاءات، التشغيل، المراجعة (راجع الشكل ٢٨-١)، وعادة ما يطلق على المراحل الثلاث الأولى من المشروع (الجدوى، التصميم الأولي، التصميم التفصيلي) بمرحلة ما قبل المشروع pre-project stage وهي المرحلة التي يتم خلالها تطوير الأفكار واختبارها ولكن دون تعهدات مالية كبيرة، وفيما يلي شرح لمراحل المشروع المختلفة.

- **مرحلة الجدوى:**

في مرحلة الجدوى feasibility phase يتم التعامل مع المشروع كمفهوم concept وتصور معين وهل بالإمكان إنجازه عملياً وما هي جدواه الاقتصادية ؟ وإذا أخذنا على سبيل المثال مشروع تنمية حقل للبترول فلا بد أن يتواكب المشروع والمعايير الاقتصادية وتوافر الموارد ومستوي المخاطرة.

وفي هذه المرحلة تكون التقديرات كمؤشرات مفيدة عند التعامل مع خيارات أو بدائل options أخرى قد تبدو غير واقعية.



شكل ٢٨-١: المراحل المختلفة للمشروع.

- **مرحلة التعريف والتصميم الأولي:**

وهنا تكون قد استبعدت الكثير من الخيارات وتقلصت بذلك فجوة الغموض وتركز الأمر حول الخيار الأنسب لتبني المشروع وإقراره بصورة واضحة من حيث كيفية الإنشاء والتشغيل والاحتمالات والعوامل الخارجية التي قد يتأثر بها المشروع (مثل ارتفاع أو انخفاض أسعار الخام)، وعادة ما يقوم المختصون بإعداد بيان واضح يكون أساسا للعمل القادم بعد أن أصبح المشروع ذا جدوى، ويتضمن هذا البيان الأسباب التي رجحت عملية الاختيار والمواصفات المطلوبة وتوافرت موارده وتقلصت مستويات مخاطرته بتواصل العمل بمرحلة التصميم الأولى primary design phase وفي ظل تقديرات للتكاليف أكثر واقعية.

إن الغرض الرئيس لمرحلة التصميم الأولى هو إعداد مستند يدعم الموافقات المالية، ويجب أن يكون مستوى التفصيل كافياً لبث الثقة في نفوس الأطراف المعنية وإقناعهم بجدوى المشروع من الناحية الفنية والعائد المالي وحث الحكومة المضيفة لمنح الموافقات اللازمة.

- **مرحلة التصميم التفصيلي للمشروع:**

بعد الانتهاء من مرحلة التصميم الأولى والحصول على الموافقات الخاصة بجدوى المشروع تبدأ مرحلة للتصميم التفصيلي detailed design phase، وهي مرحلة تتسم بزيادة في حجم المصروفات بسبب تزايد فرق العمل المنوط بها وضع التصميمات المفصلة للمشروع وإعداد الرسومات الخاصة بها، وقد أصبح شائعا في هذه المرحلة أن تقوم الشركات بالتعاقد مع جهات خارجية ومتخصصة على أن يشارك في العمل مهندسون من الشركة المعنية ويكونوا حلقة اتصال بينها وبين المقاولين الخارجيين، وبناء على هذه التصاميم التفصيلية يبدأ نشاط المشتريات والتخطيط للإنشاءات المطلوبة، وعند نهاية هذه المرحلة يكون إجمالي المصروفات قد وصل إلى حوالي ٥ ٪ من إجمالي ميزانية المشروع، وتحددت النسبة العظمى من البنود وتأكدت صلاحية التصاميم دون الحاجة إلى إدخال تعديلات عليها إلا في أضيق الحدود.

• مرحلة المشتريات:

مرحلة المشتريات procurement stage تختص بتدبير وتوفير المواد اللازمة للمشروع وشرائها في الوقت الصحيح وفي حدود الميزانية المخصصة، وتتم الموافقة على التي أنسبها سعراً وأعلاها كفاءةً، أما في حالة وجود بنود ذات طابع خاص وحساسية فائقة فيمكن الحصول عليها عن طريق مورد وحيد ومعتمد ومن خلال الأمر المباشر، أما بالنسبة للبنود والتجهيزات الجاهزة التصنيع مثل التوربينات فعادة ما تكون مصحوبة بشهادات صلاحية ويمكن اختبارها والتأكد من أدائها بشكل آمن وحسب مستويات التشغيل المحددة، كذلك ضمان ألا يكون أي من البنود قد تعرض لأضرار أثناء الشحن وخلو تلك البنود من أية عيوب فنية، كما تتضمن عملية الشراء أيضا تعهدات الجهة الموردة بتوفير قطع الغيار للمعدات وتوريدها عند طلبها تحسباً لأية أعطال مستقبلية ويكون الإصلاح متوقفاً على إحلال هذه القطع، ويبلغ حجم الإنفاق في هذه المرحلة بين ١٠ و ٤٠ ٪ من التكلفة الإجمالية للمشروع.

• مرحلة البناء والإنشاء:

وهي مرحلة تتباين كثيراً حسب طبيعة المشروع، فبناء مصنع للغاز مثلا في منطقة ريفية سوف يثير آراءً متعددة من حيث الموافقة من عدمه، وهو أمر يختلف كثيراً عن مشروع يهدف إلى إعادة تجديد منصة إنتاجية قديمة في منطقة بحرية، وبالطبع فإن النشاط الإنشائي عادة ما يعهد إلى مقاولين متخصصين يعملون تحت إشراف ممثلين للشركة العاملة وقيادة مدير الإنشاءات construction manager أو المهندس المقيم resident engineer، ويكون المدير مسئولاً أمام شركته فيما يتعلق بإنجاز العمل المنوط به المقاول وفي الحدود الزمنية والمالية المحددة، وإذا ما تعرض العمل لمشكلة ما فإن على مدير الإنشاءات بالتعاون مع فريق العمل أن يحدد تأثير ذلك الحدث على سير العملية التنفيذية وكيفية معالجة الأمر ودون إجراءات غير مرغوبة.

• مرحلة التشغيل:

عند الاقتراب من إتمام المشروع تبدأ مرحلة التشغيل commissioning phase والتي تهدف أساساً إلى أن التسهيلات والمرافق المقامة تعمل بكفاءة وتخدم الغرض الذي من أجله أنشئت، وخلال هذه المرحلة يقوم فريق الإنشاءات بتسليم المشروع إلى فريق العمليات التابع للشركة بعد التحقق من أن التركيبات والتجهيزات قد تم اختبارها وتشغيلها بنجاح وأن أداءها يسير وفق المنظومة المتفق عليها.

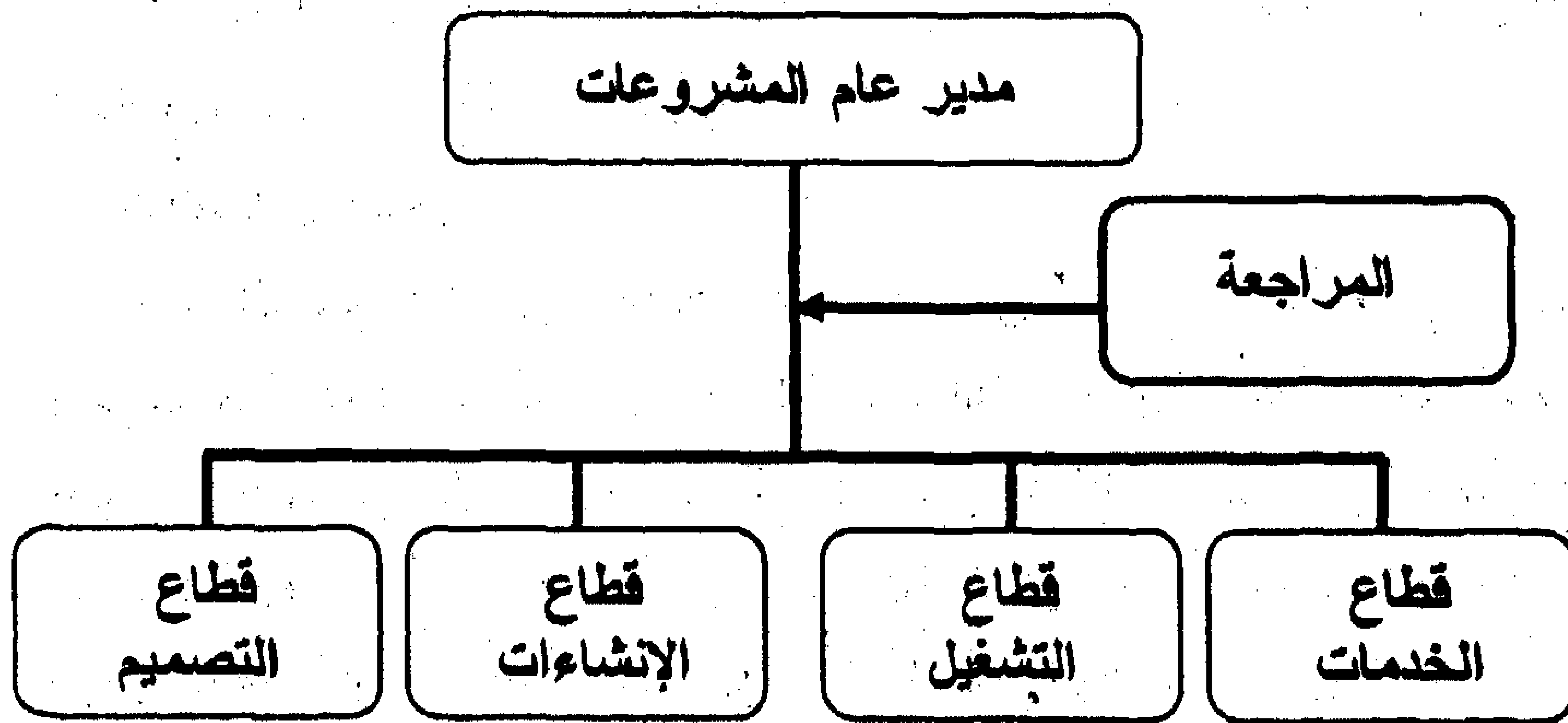
• المراجعة:

بعد الانتهاء من المشروع يتم في العادة إجراء مراجعة review للمشروع وهل سار المشروع حسب المخطط أم كان هناك اختلاف في تحقيق هذا الإنجاز؟ وما هي الأسباب التي أدت إلى ذلك؟ وما هي الدروس المستفادة التي يمكن الأخذ بها في إدارة المشروعات المستقبلية؟

وقد أصبح في كثير من الحالات عقد جلسات حوارية بين الشركات صاحبة المشروعات والمقاولين الذين شاركوا في العمل وذلك لاستكشاف أفضل الطرق عند تداول بعض الموضوعات ذات الشأن وعلى الأخص إذا كانت هناك توقعات لأنشطة مشتركة في المستقبل.

الهيكل التنظيمي لإدارة المشروعات:

يقود إدارة المشروعات بالشركة مدير مسئول هو مدير المشروعات project manager وتتركز اهتماماته حول الإدارة الرشيدة للمشروع ومتابعة مراحل الإنجاز المختلفة وعليه أيضا إبلاغ الإدارة العليا للشركة بما يجري داخل إدارته وماذا تم من إنجاز وما هي العوائق وكيفية التغلب عليها؟، ويساند المدير في مهمته فريق عمل من العاملين بالشركة وكذا بعض العاملين لدى المقاول، ومن المفترض أن تعكس أعداد هذا الفريق حجم المشروع وجوانبه المختلفة، ويوضح الشكل الآتي الهيكل التنظيمي للإدارة العامة للمشروعات project team organisation بإحدى الشركات البترولية :



شكل ٢٨-٢: الهيكل التنظيمي لإدارة المشروعات.

ويلاحظ تعدد القطاعات التي تدخل تحت مظلة الإدارة العامة للمشروعات، وتتباين مهام هذه القطاعات من التصميم إلى الإنشاءات إلى التشغيل وحيث يقوم على خدمتها قطاع الخدمات والمعلومات وتدبير المشتريات التي يحتاجها المشروع، كما يقوم فريق المراجعة المستقل بأعمال المتابعة والتدقيق المنوطة به ضماناً لسير العمل على الوجه المطلوب.

- **التخطيط والمراقبة:**

لضمان إدارة أي مشروع بنجاح وفاعلية لا بد أن تكون هناك ضمن الهيكل التنظيمي للمنشأة إدارة للتخطيط والمراقبة planning and control تكون مقبولة ومعترف بها من قبل جميع المستويات الإدارية والفنية هناك، ولتخطيط المشروعات يلزم إعداد جداول واقعية realistic schedules تشمل القوى العاملة وبنود المشتريات والموارد المالية، كما ينبغي أن تتضمن الجداول الزمن المخصص للمشروع ولكل مرحلة منه بما في ذلك احتمالات التأخير في الإنجاز بناءاً على الخبرة السابقة خاصةً إذا لم يكن قد اتخذ إجراء حيال ذلك لعدم تكراره مستقبلا.

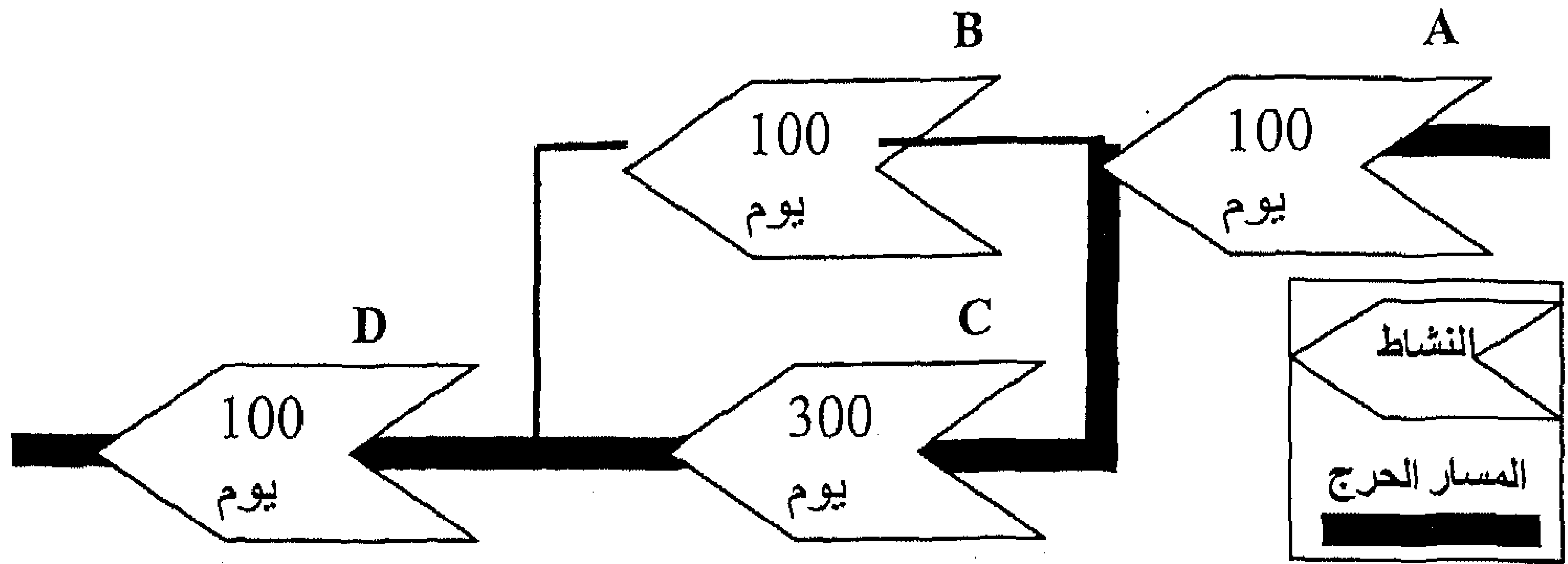
وبمتابعة الجداول الزمنية والتخطيطية يمكن إدراك ما تم إنجازه وما تبقى وكيفية الأداء والتنفيذ، وعدم الانحراف عن الموازنة المعتمدة وأن مسار المشروع لا يزال ضمن الحدود المسموح بها والمتعارف عليها خلال كل مرحلة من المراحل الموضحة بتلك الجداول.

وفي هذا الشأن هناك عدد من الأساليب التي تستخدم على نطاق واسع في تحليل الأداء في المشروعات، نذكر منها ما يلي:

١) التحليل الشبكي:

يعتبر التحليل الشبكي network analysis من الأساليب الشائعة في الصناعة ويعرف عادة بتحليل المسار الحرج critical path analysis (CPA)، وهو يقوم على تحليل جداول المشروعات مرحلة بمرحلة حتى يتم إنجاز كل مرحلة بصورة منطقية دون حيود سافر عن المسار المخطط له، وفي هذه التحليلات تعطى لكل نشاط من الأنشطة فترة زمنية محددة ويكون أطول طريق على شبكة التحليل هو المسار الحرج.

ولتوضيح ذلك دعنا نفترض المثال الآتي والمبين بالشكل ٢٨-٣.



شكل ٢٨-٣: شبكة تخطيط المشروع.

في هذا المثال هناك أربعة أنشطة ذات علاقات مشتركة A وB وC وD، وقد تحدد لكل نشاط فترة زمنية معينة، وفي هذه الحالة يكون الطريق ذو الـ ٦٠٠ يوم هو المسار الحرج ذلك أن النشاط الأخير (D) من المشروع لا يمكن أن يبدأ إلا بعد إنجاز جميع الأنشطة التي سبقته.

وإذا ما تم بناء الشبكة يمكن مراجعتها لتحديد ما إذا كان يوم الإنجاز وكذا الأيام الأخرى ذات الأهمية بالنسبة للمشروع يمكن قبولها، وإذا تبين أن هذه التحديدات ليست واقعية فإنه يمكن تعديلها واختصار عدد الأيام كأن يكون عن طريق زيادة القوى العاملة مثلاً أو تغيير الموردين أو إيجاد وسائل أخرى.

٢) مخططات الأعمدة:

بينما يكون التحليل الشبكي مفيداً في تقدير التوقيتات والموارد فهو لا يبدو وسيلة جيدة لإبراز قيمة الجداول الزمنية، ومن هنا كانت أهمية مخططات الأعمدة bar charts في إظهار توقعات التخطيط وكذا تحديد تحميلات الموارد، والشكل ٢٨-٤ يمثل الشبكة الواردة في الشكل ٢٨-٣ في هيئة مخططات الأعمدة وحيث يمكن أيضاً إظهار تحميلات الموارد resource loading.

ويوضح هذا المخطط أن النشاط (B) يمكن إجراؤه في أي وقت خلال الأيام ٢٠٠ و٣٠٠ و٤٠٠ دون حدوث أي تأخير في سير المشروع، وهو يُظهر أيضاً أن تحميل الموارد يمكن أن يكون سلساً إذا ما تم إجراء النشاط (B) في الأيام ٣٠٠ أو ٤٠٠ على أن التحميل الأقصى عند أي فترة لا ينبغي أن يتجاوز ٤ وحدات. وهذه الوحدات يمكن أن تتعلق بساعات العمالة man hours أو ساعات التشغيل machine hours .

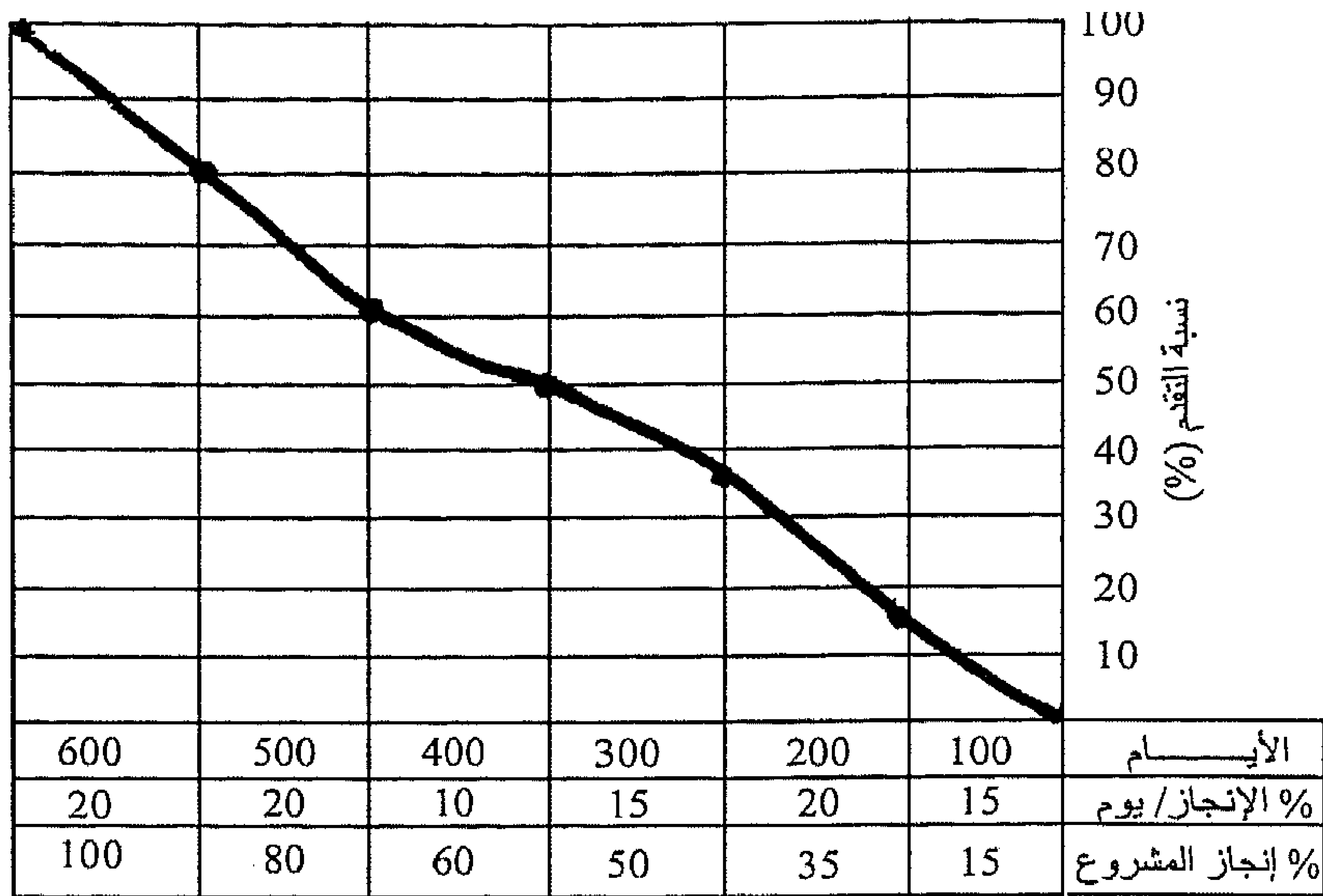
ويمكن أيضاً أن يتم تحميل الموارد على هيئة نسبة مئوية (شكل ٢٨-٥) لإعطاء إشارة إلى أن التوزيع التثقيلي (الوزني) weighting distribution هو على أساس يومي بالنسبة لكل نشاط (لاحظ أن النشاط (B) تم تحريكه إلى الأيام ٣٠٠ وذلك لسلاسة تحميل الموارد).

الزمن / النشاط	الأيام					
	١٠٠	٢٠٠	٣٠٠	٤٠٠	٥٠٠	٦٠٠
A	٣٠٠					
B		١٠٠				
C		٤٠٠	٢٠٠	٢٠٠		
D					٤٠٠	٤٠٠
الإجمالي	٣٠٠	٥٠٠	٢٠٠	٢٠٠	٤٠٠	٤٠٠

شكل ٢٨-٤: مخطط الأعمدة الأفقية وتحميلات الموارد.

النشاط	الوزن / اليوم						الوزن لكل نشاط
	١٠٠	٢٠٠	٣٠٠	٤٠٠	٥٠٠	٦٠٠	
A	٪١٥						٪١٥
B			٪٥				٪٥
C		٪٢٠	٪١٠	٪١٠			٪٤٠
D					٪٢٠	٪٢٠	٪٤٠
الإجمالي	٪١٥	٪٢٠	٪١٥	٪١٠	٪٢٠	٪٢٠	٪١٠٠

شكل ٢٨-٥: الهيكل التثقيلي (الوزني) الوزني للموارد.



الأيــــــام	100	200	300	400	500	600
% الإنجاز/ يوم	15	20	15	10	20	20
% إنجاز المشروع	15	35	50	60	80	100

شكل ٢٨-٦: مخطط بيان التقدم (منحنى حرف S).

٣) منحنيات بيان التقدم:

عادة ما يطلب تقديم رسم بياني يوضح التثقيل التراكمي للموارد مقابل الزمن بالنسبة لمشروع معين، ويمكن أن يتم ذلك عن طريق ما يعرف بمنحنيات التقدم أو المنحنيات الدورية progress curves أو ما تسمى منحنيات "حرف S" (شكل ٢٨-٦)، ويلاحظ أن المشروعات غالباً ما تحتاج إلى بعض الوقت لكي تكتسب الزخم momentum وتعود للتباطؤ كلما اقتربت من الانتهاء، ويمكن الاستفادة أيضاً من هذ المنحنيات من المقارنة بين التقدم الفعلي وما هو مخطط، وإذا ما حدث أي تأخر في التقدم عند نقطة ما مع عدم إمكانية ترحيل تاريخ الانتهاء فإنه بناء على معطيات المنحنى يمكن إيجاد حل لهذه المشكلة من حيث تحديد عدد وحدات الموارد التي يلزم إضافتها لكي يتم إنجاز المشروع في الوقت المخطط له.

تقدير التكاليف والميزانيات:

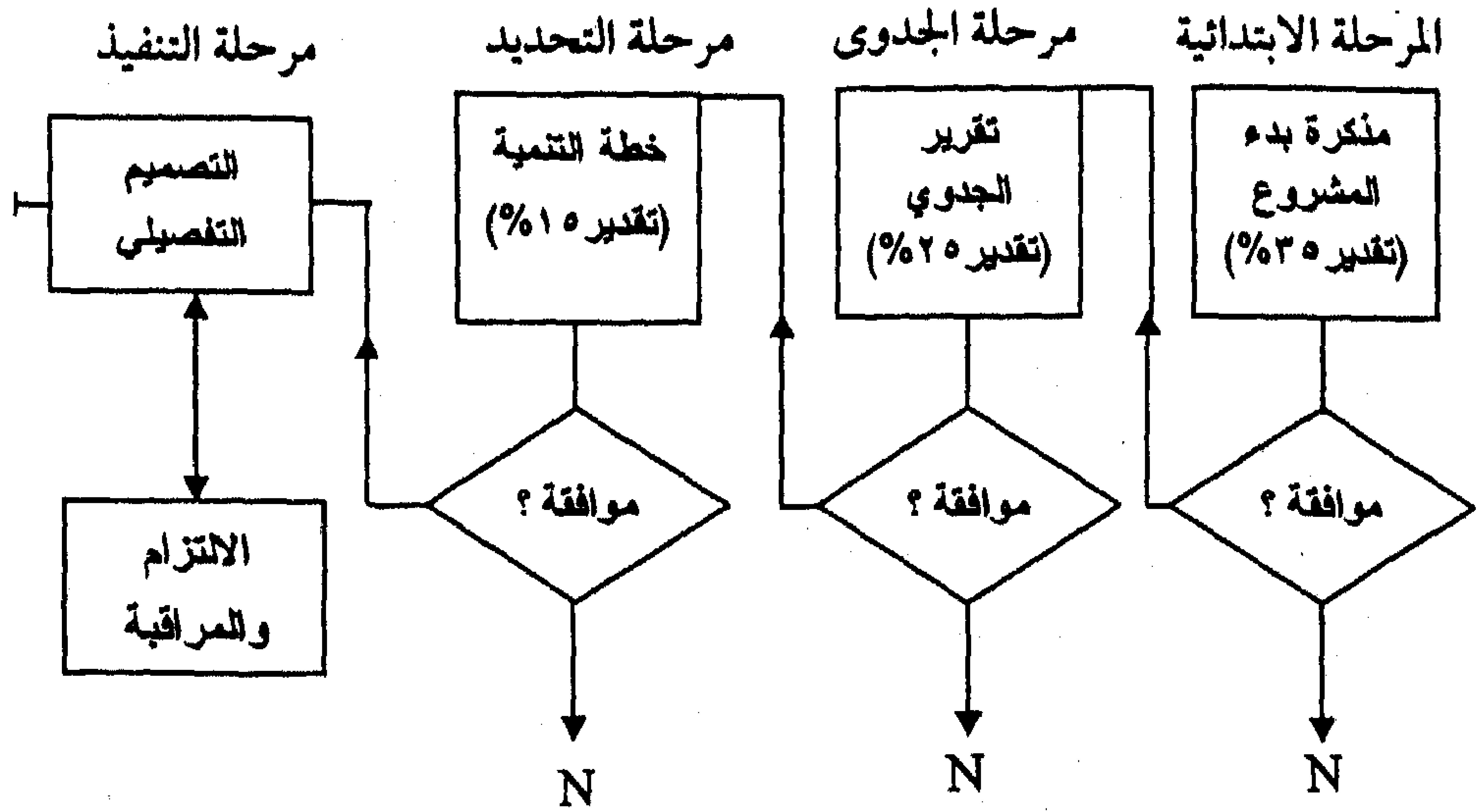
عند كل مرحلة من المشروع يتطلب الأمر الحصول على تقدير للتكلفة cost estimation وذلك للمساعدة في اتخاذ القرارات المناسبة، وفي المرحلة الابتدائية تكون التقديرات تقريبية للغاية (مثلا ±٣٥٪ من الدقة)، وهذا بسبب درجة الغموض التي تتعلق بتنمية الخزان المنتج وكذا الخيارات السطحية، وبالطبع فإنه كلما تقدم المشروع ازدادت دقة التقدير وتحسن الأداء.

إن تقديم تقديرات estimates مناسبة لتكلفة المشروع له أهمية في التحليل الاقتصادي، فإذا كان هناك بخس في تقدير التكلفة underestimating cost يقود ذلك إلى صعوبات في الاعتمادات المالية وربما أدى ذلك إلى الحصول على ربحية أقل، كذلك فإنه عند وضع تقديرات مفرطة overestimating وأعلى من الحقيقة ربما أدى ذلك إلى وأد المشروع في مهده، وغالباً ما يكون تقدير التكاليف مبنياً على الأسعار التي لدى المورد وربما تم الحصول عليها من المعلومات المتداولة، وعلى الرغم من ذلك هناك العديد من المشروعات الناجحة في مجالات تنمية حقول البترول والغاز الطبيعي والتي كان الاعتماد في إعدادها على الناحيتين التقنية والهندسية ذواتا الوثوقية العالية.

وتقسم تقديرات التكاليف إلى بنود تتباين في ثباتها بحسب ارتباطها بدرجات الغموض أو إلى عوامل مستجدة، فعلى سبيل المثال أن إنشاء خط أنابيب هو في حد ذاته بند ثابت firm ولكن إقامته قد يتوقف على الظروف المحلية مثل حالة الطقس السائد مما يقتضي ذلك الأخذ في الاعتبار وأن تتقرر فترة سماح allowance لتغطية نفقات إضافية لمركب الشحن والتفريغ lay-barge بسبب تلك الظروف الخاصة.

وتقدر البنود الثابتة firm items غالباً باستخدام مخططات التكلفة مقابل حجم وطول المشروع، كما يشكل إجمالي البنود المدرجة بالإضافة إلى تقديرات السماح التقدير المبدئي preliminary للمشروع، وعلاوة على ذلك هناك تقدير للطوارئ contingency يتم إضافته للتغيرات المتوقعة ولكن غير المحددة مثل ما يتعلق بتغطية أي تغييرات في التصاميم والأعمال الإنشائية للمشروع، والهدف من ذلك كله هو التوصل إلى تقدير وسطي بين المغالاة والبخس وهو ما يعرف بتقدير النصف/ نصف "50/50 estimate".

والشكل ٧-٢٨ يمثل تدرج وتطور تقدير التكاليف cost estimate evaluation خلال المراحل التنفيذية لأحد المشروعات البترولية.



شكل ٢٨-٧: تطور تقديرات التكاليف.

التعاقدات وأسبابها:

تعتبر أغلب شركات البترول العاملة أن مرحلة التصميم التفصيلي والإنشاءات الخاصة بتسهيلات الإنتاج ليست جزءاً من لب عملها، لذلك فإنها تلجأ إلى شركات المقاولة وبيوت الخبرة الهندسية المتخصصة لإنجاز هذه المهمة ولكن هذا لا يمنع من متابعة سير العمل بالمشروع من جانب الشركة العاملة والحث على الإنجاز في الوقت المحدد وبالجودة المطلوبة ومن خلال عقود تبرم بين الأطراف المعنية، انطلاقاً من الأسباب الآتية:

- أن الخدمة التي سيقدمها المقاول ستكون أرخص مما لو قامت الشركة العاملة بأدائها عن طريق مواردها الخاصة.
- أن الخدمة المطلوبة ذات طبيعة تخصصية غير متوفرة بالشركة العاملة.
- أن الخدمة أو الخدمات المطلوبة هي لفترة زمنية محددة ولا ترى الشركة العاملة جلب المزيد من القوى العاملة لأدائها مما يشكل عبئاً مالياً وإدارياً ليس في مصلحتها.

أنواع العقود:

لحماية الأطراف ذات الاهتمام من أي نزاعات مستقبلية يكون من الأمر الجيد أن يتضمن العقد المبرم الإطار المحدد للعمل وتاريخ الانتهاء وإنجاز المشروع وكذا طريقة

السداد للمقاول، وعادة ما تمنح العقود من خلال مناقصات tenders تنافسية تعلن عنها الشركة العاملة، أو من بعد التفاوض والمنح عن طريق الأمر المباشر إذا كان المورد وحيداً، وهناك العديد من أنواع العقود لتأدية الخدمات المختلفة ولكن البعض منها هو الأكثر شيوعاً وتشمل:

- عقد بمبلغ إجمالي (عقد الجملة) lump sum contract :حيث يقوم المقاول بإدارة وتنفيذ العمل الموكل إليه خلال فترة زمنية محددة ومبلغ مالي متفق عليه، وربما كان هناك شرط أو شروط جزائية عند التأخير في الانتهاء من المشروع مما يحفز على ضرورة الانتهاء في التاريخ المنصوص عليه، ويمكن أن يتم السداد على دفعات بعد الانتهاء من كل مرحلة رئيسة وذلك على حسب الاتفاق.
- عقد كشوف الحساب bills of quantities contract :ويقسم العمل في هذا النوع من العقود إلى مكونات رئيسة ومفصلة وتحدد أيضا أسعار المواد والعمالة المطلوبة.
- عقد جدول المعدلات schedule of rates contract :وفيه تحدد تكلفة العمالة على أساس معدل متفق عليه ولكن تكلفة المواد وعدد الساعات الفعلية ليست محددة.
- عقد التكلفة زائد الربح cost plus profit contract :وفيه تلتزم الشركة بسداد كل التكاليف للمقاول بالإضافة إلى نسبة ربح profit free يحصل عليها المقاول.

وتعتبر عقود الجملة هي المفضلة للشركات المانحة خاصة وأن هذه العقود تنص على حوافز واضحة للمقاول إذا تم الإنجاز في التاريخ المحدد وبالأسعار المتفق عليها.

وبالطبع فإن اختيار نوع التعاقد يتوقف على نوع العمل وطبيعته ومستوى المراقبة الذي تسعى إليه الشركة، وهناك اتجاه في الوقت الحاضر من قبل شركات البترول وهو اعتبار المقاول شريكاً partner في المشروع، وأن يجري العمل بصورة لصيقة مع المقاول خلال جميع مراحل تنفيذ المشروع، والهدف من هذه المباشرة اللصيقة هو تقديم حافز incentive مشترك لكل من المقاول والشركة العاملة لتحسين الجودة والكفاية والسلامة ولتقليص التكلفة في المقام الأول، وهذا النوع من العقود يتضمن عنصراً مهماً للمشاركة في المخاطرة والمكافأة sharing risk and reward على حد سواء.

الفصل التاسع والعشرون
اقتصاديات البترول

مقدمة:

ليس الهدف من هذا الفصل هو الدراسة المفصلة لاقتصاديات البترول كأحد فروع العلم الحديث، ولكن تقديم قدر كاف من المعلومات يفيد منها المهتمون بنشاطات الاستكشاف وتنمية الحقول والتي ترتبط باستثمارات مالية طائلة قد تتجاوز البلايين (المليارات) من الدولارات وتحمل في طياتها المخاطرة من حيث النجاح أو الفشل.

وتشير أنشطة العمل في مجالات استكشاف وإنتاج البترول والغاز الطبيعي إلى وجود العديد من الفرص الاستثمارية في هذه المجالات بالمناطق المختلفة، وعلى الرغم من أن بعضاً من حقول البترول في بحر الشمال وخليج المكسيك وألاسكا مثلاً قد أوشكت على النضوب لا تزال هناك أيضاً حقول تجري تنميتها ليس فقط داخل هذه المناطق ولكن أيضاً في أنحاء أخرى من العالم مثل أمريكا الجنوبية وأفريقيا وجنوب شرق آسيا وأستراليا وغيرها، كما أن ثمة عدداً من الحقول التي تعاد تنميتها بعد أن تأكد وجود امتدادات أخرى لها بل ونُطُق بترولية جديدة بداخلها.

إن تنمية حقول البترول من المشروعات الباهظة التكاليف خاصة في المناطق المغمورة بالمياه بسبب ما يكتنفها من غموض يصعب معه تقدير الاحتياطيات البترولية بتلك المناطق، فقد تتكلف تنمية حقل بترولي متوسط الحجم (مثلا ١٠٠ مليون برميل) نحو ٥٠٠ مليون دولار أمريكي وربما أكثر، كما أن نسبة الغموض قد تصل إلى ما يقرب من ±٢٥٪، وبالرغم من ذلك فإن هذا الأمر لا يثني الشركات العاملة في المجال عن الدخول ولو بحذر في عمليات التنمية لما يتبع ذلك من ربحية متوقعة.

أما إذا كانت نتيجة العمل هي الفشل ففي ذلك خسارة كبيرة للمستثمر، وبالتالي يكون من الضروري بذل أقصى الجهد لمعرفة أسباب هذا الفشل لتفادي نتائج مماثلة في المستقبل، وهنا يبرز الدور الكبير وما يقدمه علم اقتصاديات البترول petroleum economics فيما يتعلق بتقييم المخاطر وكيفية تقليصها وما يمكن تقديمه من نصح بشأن

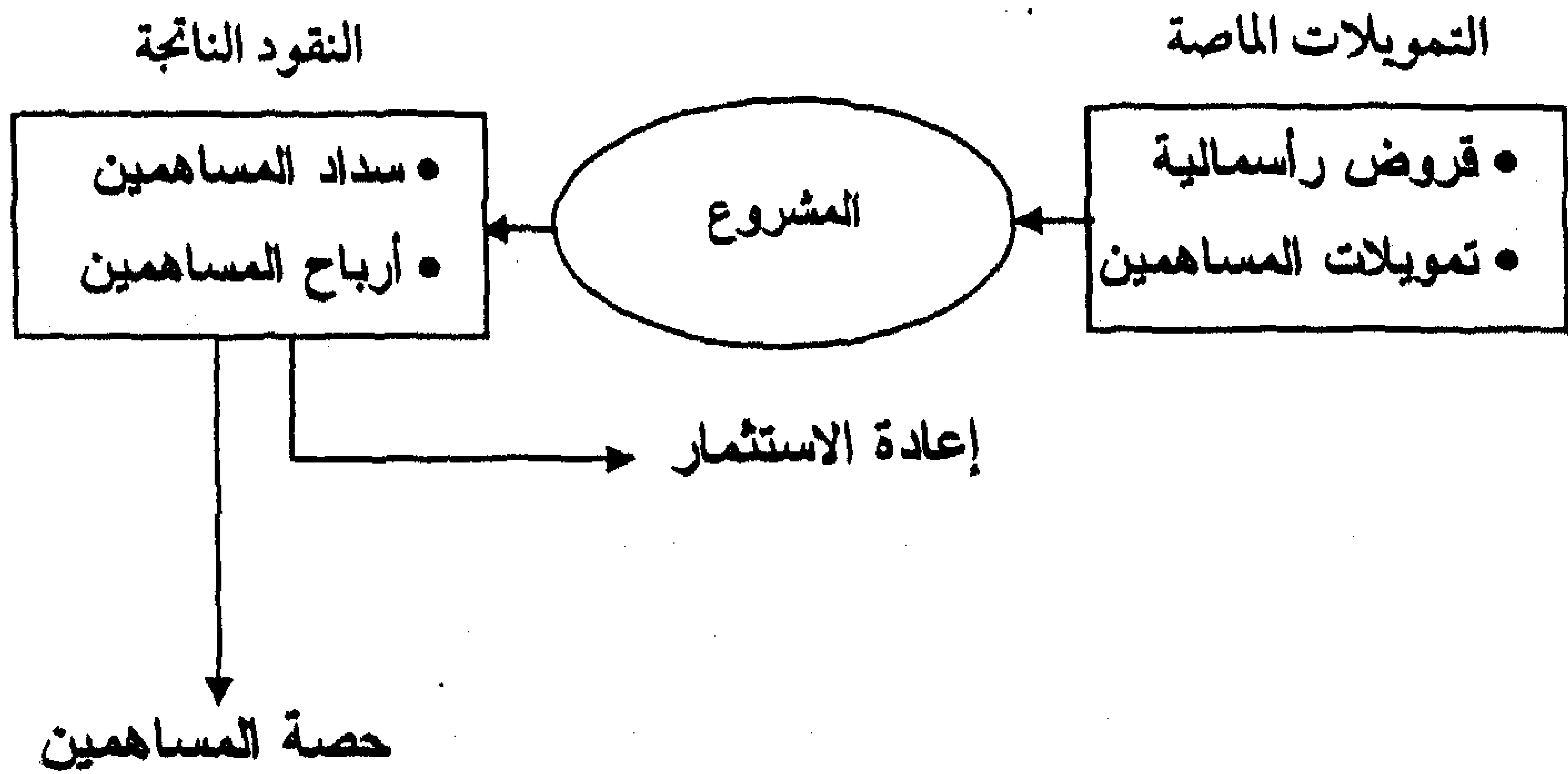
جاذبية فرص الاستثمار وكيفية تعظيم الأصول assets المالية المتواجدة، ولنبدأ بفهم أسس اقتصاديات البترول في مرحلة تنمية الحقول وهي تشكل الجانب الأكبر في حياة المشروع والتي تلي مرحلة البحث والاستكشاف.

اقتصاديات تنمية الحقول:

يتطلب التحليل الاقتصادى لفرص الاستثمارات جمع أكبر قدر من المعلومات مثل التكاليف الرأسمالية والتكاليف التشغيلية والعائدات المتوقعة وبنود التعاقدات والهياكل الضريبية والتنبؤات السعرية للزيت والغاز وتوقيتات المشروع وتوقعات المساهمين في هذه الإستثمارات، وبطبيعة الحال فإن المعلومات اللازمة يجري جمعها من مصادر وإدارات مختلفة مثل هندسة البترول والإدارة الهندسية والمشروعات والعقود والجهات الأخرى ذات الاهتمام، وكل معلومة تحمل معها عادة جانباً من الريبة والغموض. ولبناء صورة واقعية حول هذا الشأن يتطلب الأمر الكثير من الوقت والعمل، ومن هنا يبرز دور النموذج الاقتصادى economic model لتقييم فرص الاستثمار وهو ما يتم عادة بواسطة البرمجيات واستخدامات الحاسب الآلي، كذلك فإن الغموض في البيانات المدخلة إلى النظام وكذا الإفتراضات التي قد ترتبط بهذا الشأن يمكن تداولها عن طريق بناء حالة قاعدية base case تعتمد على أفضل تخمين best guess للمتغيرات حيث يمكن بالتالي إجراء تحليل الحساسية الخاصة بهذه المتغيرات كما سنري فيما بعد.

التدفق النقدي وعناصره:

من وجهة النظر الاقتصادية يعتبر أي مشروع استثماري نشاطاً يمتص في البداية التمويل المالي ثم يدر بعد ذلك عائداً نقدياً، ويأتي هذا التمويل المالي عن طريق القروض أو مساهمات الشركاء، كما أن النقود الناتجة يمكن استخدامها في سداد الفوائد على القروض أو توزيعها كأنصبة وأرباح على المساهمين أو إعادة استثمارها لتمويل المشروع القائم أو أية مشروعات مستجدة، ويمثل الشكل ٢٩-١ رسماً تخطيطياً للتدفق الإجمالي للتمويل المالي للمشروع المقترح والحركة التفصيلية للنقود الناتجة.



شكل ٢٩-١: نموذج للتدفق النقدي.

ومن هذا الشكل يتضح أن أي مشروع لابد أن يدر عائداً كافياً على التمويلات الماصة absorbing funds حتى يمكن سداد الفائدة على الدين وأيضاً سداد الأنصبة المتوقعة للمساهمة، وفي حالة تبقي بعض النقود فإنه يمكن استثمارها في نفس المشروع أو في مشروعات أخرى.

وفي خانة المشروع يمثل التدفق النقدي cash flow التنبؤات والتوقعات الخاصة بالتمويلات المالية الماصة وكذا العائد النقدي الناتج generating money أثناء حياة المشروع، ولنأخذ على سبيل المثال تنمية حقل بترولي كإحدى الفرص الاستثمارية، ففي البداية سوف يتمثل التدفق النقدي في المصروفات الرأسمالية capital (CAPEX) expenditure اللازمة لتصميم وإنشاء وتشغيل المكونات الرئيسة للمشروع مثل المنصات وخطوط الأنابيب والآبار والضواغط وغيرها، وعندما يبدأ الإنتاج (بعد ٣ – ٨ سنوات مثلاً من بداية النفقات الرأسمالية) فإنه يمكن الحصول على الفوائد الإجمالية gross revenues وذلك من بيع الهيدروكربونات المنتجة وتستخدم هذه العوائد في استرداد المصروفات الرأسمالية للمشروع وسداد مصروفات التشغيل operating (OPEX) expenditure مثل أجور العاملين والصيانة وتكاليف التشغيل والمصروفات المعاونة وأيضاً حصة الحكومة المضيفة من المشروع في هيئة ضرائب أو إتاوات، وبعد أن تسدد الشركة ما عليها من مستحقات تكون في وضع يمكنها من دفع الفوائد على القروض وتوزيع أنصبة المساهمين أو إمكانية الاستثمار من جديد نيابة عن المساهمين في المشروع ذاته

أو في مشروعات أخرى، وبالنسبة للمستثمر أو الشركة فإن الفرق بين النقود الممتصة بواسطة المشروع والنقود المتولدة (بعد خصم الضرائب المستحقة) هو ما يعرف بالتدفق النقدي للمشروع project cash flow وهو ما يشكل الأساس لطرق التقييم الاقتصادي، ومن هذا التدفق النقدي هناك عدد من المؤشرات الاقتصادية التي يمكن التعامل معها واستخدامها للحكم على جاذبية المشروع.

وكما سبق القول فإن مهمة جمع البيانات والمعلومات قد تكون طويلة للغاية وكل معلومة تحمل بداخلها نسبة من الريبة والغموض uncertainty، وعلى سبيل المثال ففي مرحلة التقييم لحقل بترولي فإن الغموض في تقديرات الاحتياطي والتنبؤات الإنتاجية قد يصل إلى ±٥٠٪، ولكن بإضافة معلومات جديدة يتقلص الغموض ويتزايد هذا التقلص لتصل نسبة الغموض قبيل نقطة إتخاذ القرار إلى نحو ±٢٥٪، وللتعامل مع الغموض وتقييمه يمكن أن يتم ذلك من خلال بناء الحالة القاعدية التي أشرنا إليها من قبل والتي تمثل المخرجات الأكثر احتمالا مع إجراء تحليل للحساسية sensitivity analysis حول هذه الحالة لتحديد أي من مدخلات المشروع هي الأقل فاعلية.

وبناءاً عليه فإنه عند جمع البيانات من المصادر المختلفة يقتضي الأمر معرفة نوع ومقدار الغموض، وعلى وجه الخصوص عند تقدير تكاليف التشغيل يكون على مهندس العمليات والصيانة الالتزام بالمواصفات المقترحة من جانب مهندسي التصاميم، وعلى سبيل المثال فإن تكلفة التشغيل والصيانة بدون عمالة بشرية سوف تختلف كثيراً عن مثيلاتها في حالة استخدام العمالة، وفي أي من هذه الحالات (مثلاً الحالة القاعدية) فإن التدفق النقدي للمشروع يمكن بناؤه عن طريق حساب بنود العائد السنوي للمشروع بعد خصم المصروفات الرأسمالية والمصروفات التشغيلية وحصة الحكومة المضيفة ولكل سنة يكون ذلك العائد هو الفائض النقدي cash surplus أو ربما العجز النقدي cash deficit إذا كانت الإيرادات أقل من المصروفات حيث إن الفائض النقدي= الإيرادات – المصروفات.

ويتطلب بناء التدفق النقدي للمشروع الحصول على عدة معلومات من مصادر مختلفة، ويوضح الجدول الآتي نوع المدخلات الأساسية التي يعتمد عليها هذا البناء ومصادره.

جدول ٢٩-١: عناصر التدفق النقدي للمشروع

المصدر	المعلومة
هندسة البترول	- الاحتياطات البترولية. - التنبؤات الانتاجية للزيت والغاز.
هندسة الحفر والإنتاج	- تكلفة الحفر وإكمال الآبار. - المصروفات الرأسمالية: • المنصات البحرية. • خطوط الأنابيب . • الضواغط والمضخات.
العمليات والصيانة	- تكاليف العمليات: • الصيانة. • إصلاح الآبار. • الأجور.
الموارد البشرية	- الأجور والعمالة: • المشُغّلون. • العمالة الفنية. • العمالة المعاونة. • المصروفات الإدارية.
الحكومة المضيفة	- النظام المالي: • الضرائب. • الإتاوة. • حالة الشركة. • حالة المشروع.
التخطيط	- التنبؤات السعرية (زيت / غاز). - معدلات الخصومات. - البورصة. - التضخم المالي. - عوامل السوق. - المخاطرة الجيوسياسية والالتزامات المجتمعية.

ويعرف الفائض النقدي عادة بالتدفق النقدي الصافي net cashflow، ويبين الجدول الآتي بنود الإيرادات والمصروفات المقابلة:

جدول ٢٩-٢: البنود النموذجية للإيرادات والمصروفات.

الإيرادات	المصروفات
• الإيرادات الاجمالية من مبيعات الهيدروكربون	المصروفات الرأسمالية مثل المنصات وتسهيلات الإنتاج والآبار (أصول ذات أعمار أكثر من سنة)
• التعريفة الواردة	المصروفات التشغيلية مثل الصيانة والتأمين (أصول ذات أعمار أقل من سنة)
• المدفوعات لبيع المشروع أو جزء منه	حصة الحكومة: الإتاوة. الضريبة.

الإيرادات المالية:

عند تقدير الإيرادات الإجمالية gross revenues من بيع الزيت أو الغاز يكون ذلك عن طريق افتراض أسعار لكل منهما، والتي غالباً ما تكون بالنسبة للزيت الخام على أساس الأسعار المتداولة مع الأخذ في الاعتبار معدلات التضخم inflation rates أو أن تكون بالمقارنة بأسعار الخامات القياسية marker crude (مثل خام برنت في بحر الشمال وخام دبي في الشرق الأوسط) بعد إجراء تعديلات تتناسب وجودة الخام المنتج وكذا الموقع الجغرافي له، أما بالنسبة للغاز فإن تسعيره يتم بالاسترشاد بالأسعار السائدة في الأسواق العالمية وحسب القيمة الحرارية له وعلى أساس ما يسفر عنه التفاوض بين الأطراف المعنية، وقد يثبت السعر المتفق عليه على مدى فترة زمنية طويلة للغاية، وربما شمل العمر الإنتاجي للحقل برمته مما قد ينشأ عن ذلك خلاف بين الأطراف المعنية قد يصل إلى نزاعات قضائية خاصة إذا ما حدثت تقلبات دراماتية في أسعار بيع الخام ومدى منافستها مع أسعار الطاقة الأخرى البديلة.

المصروفات الرأسمالية ومصروفات التشغيل:

تنقسم النفقات في مشروعات قطاع البترول بناء على النظام المالي في البلدان المختلفة إلى نوعين رئيسين هما:

المصروفات الرأسمالية capital expenditure (capex) .

ومصروفات التشغيل operating expenditure (opex) .

وتدخل تحت المصروفات الرأسمالية تلك البنود التي يجري الاستفادة منها لأكثر من عام مثل المنصات الإنتاجية وخطوط الأنابيب والآبار، أما تلك التي لا يتعدى عمرها التشغيلي العام الواحد مثل المواد الكيميائية المستخدمة وأعمال الصيانة والإصلاح والإحلال والخدمات والمصروفات الإدارية والتأمينات فتصنف على أنها مصروفات تشغيلية أو ما يطلق عليها البعض مصروفات التشغيل operating expenses.

وعادة ما تكون الإدارة الهندسية بالشركة هي الجهة المسئولة عن تحديد التكاليف الرأسمالية باحتمالات تقدر بين ٥٠٪ بالزيادة و٥٠٪ بالنقصان، أما بالنسبة لمصروفات التشغيل فيتم تقديرها على أساس أنشطة معينة تجرى أثناء العمر الإنتاجي للحقل وتتمثل في حجم أعمال الصيانة والإصلاحات والإحلالات ومقدار ما تحتاجه من قوي عاملة.

ولا ينبغي أن يغفل أي تقدير للمصروفات التشغيلية قيمة المصروفات الإدارية للمشروع، وعلى سبيل المثال تكلفة العمالة المعاونة وإيجارات المكاتب والتي قد تشكل جانباً كبيراً من إجمالي المصروفات التشغيلية ولا تتأثر بتدني الإنتاج من عدمه، ومجموع المصروفات الرأسمالية والمصروفات التشغيلية يسمي التكلفة الفنية technical cost أو التكلفة الكلية total cost.

نظم التعامل الاقتصادى في تنمية الحقول:

في التعامل الاقتصادى بين الأطراف المعنية عند تنمية حقول البترول هناك نظامان شائعان هما: نظام الضريبة والإتاوة ونظام اقتسام الإنتاج، ولقد ألمحنا إلى ذلك في الفصل الثالث عشر ولكنا هنا نتناول ذلك الأمر من ناحية المدخل الاقتصادى والتدفقات النقدية والربحية المتوقعة من المشروع.

(١) نظام الضريبة والإتاوة:

يحدد النظام المالي للحكومة المضيفة الطريقة التي تحصل بموجبها هذه الحكومة على حصتها من النشاط الإنتاجي سواء أكان ذلك من كمية الخام المخصصة لها أو من مبيعات الخام، وأبسط الأنشطة المالية في هذا الشأن هو التحصيل عن طريق فرض ضريبة tax أو إتاوة royalty على الشركات العاملة وعادة ما يتم سداد الإتاوة كنسبة من الإيرادات الواردة من مبيعات الخام ويمكن أن يكون السداد إما نقداً أو نوعاً (مثلاً زيت خام)، ويكون السعر السائد للزيت هو المرجع وذلك حسب المعادلة الآتية:

قيمة الإتاوة = معدل الإتاوة (٪) × كمية الخام المنتج (برميل) × سعر الخام (دولار/ برميل)

وبالإضافة إلى الإتاوة هناك نوع أو نوعان من الضرائب taxes التي يمكن جبايتها مثل الضريبة على المؤسسات corporation tax والضريبة الخاصة بالخام special petroleum tax ، وعند حساب الضريبة هناك مخصصات معينة يمكن تقديمها مقابل الإيراد الإجمالي قبل تطبيق المعدل الضريبي tax rate، وتسمى هذه البنود التكاليف المالية fiscal cost وهي تتضمن المصروفات التشغيلية والمخصصات الرأسمالية capital allowances وهي من البنود الخاضعة للخصم.

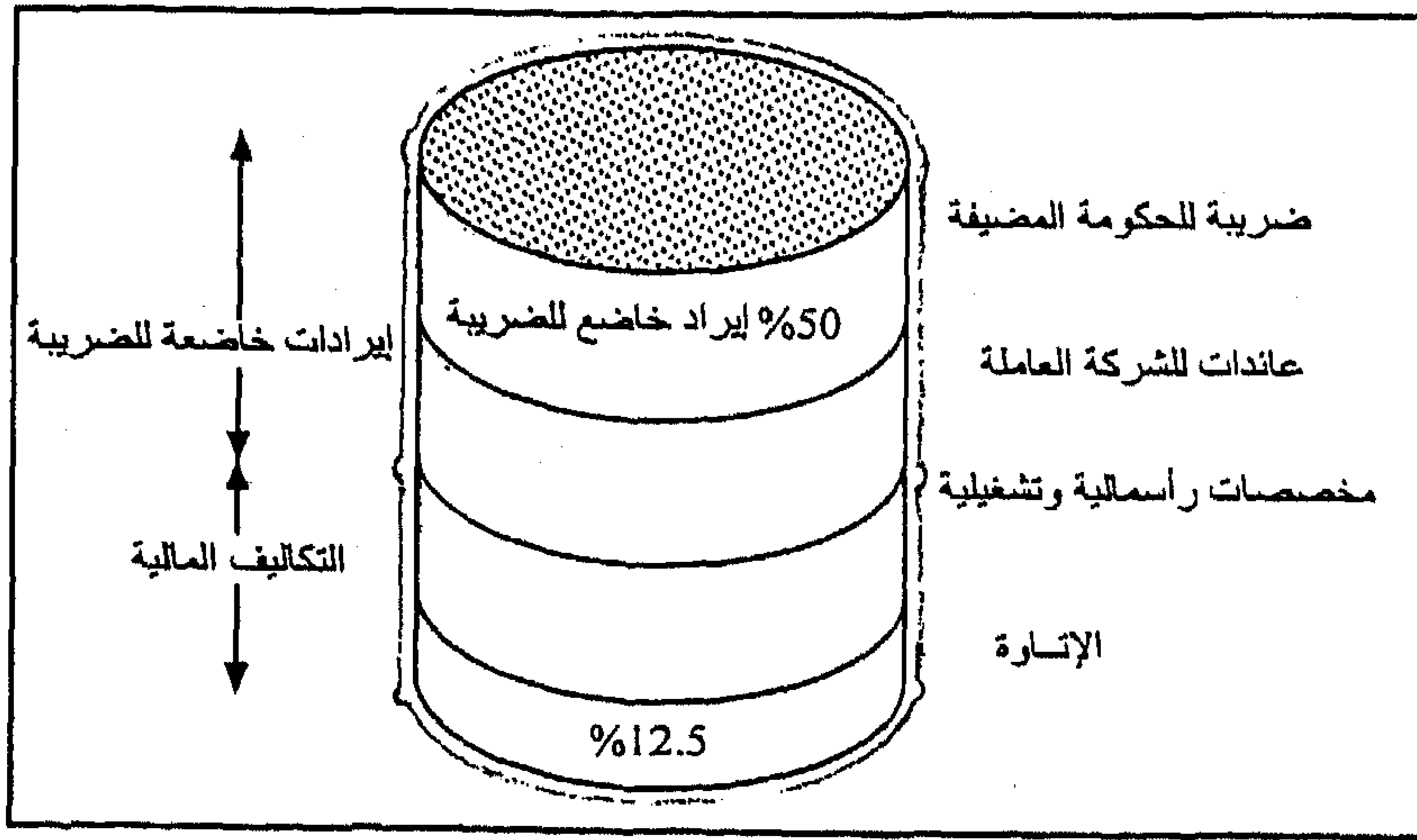
التكاليف المالية (دولار) = الإتاوة + المصروفات التشغيلية + المخصصات الرأسمالية

الدخل الخاضع للضريبة = الإيرادات – التكاليف المالية (دولار)

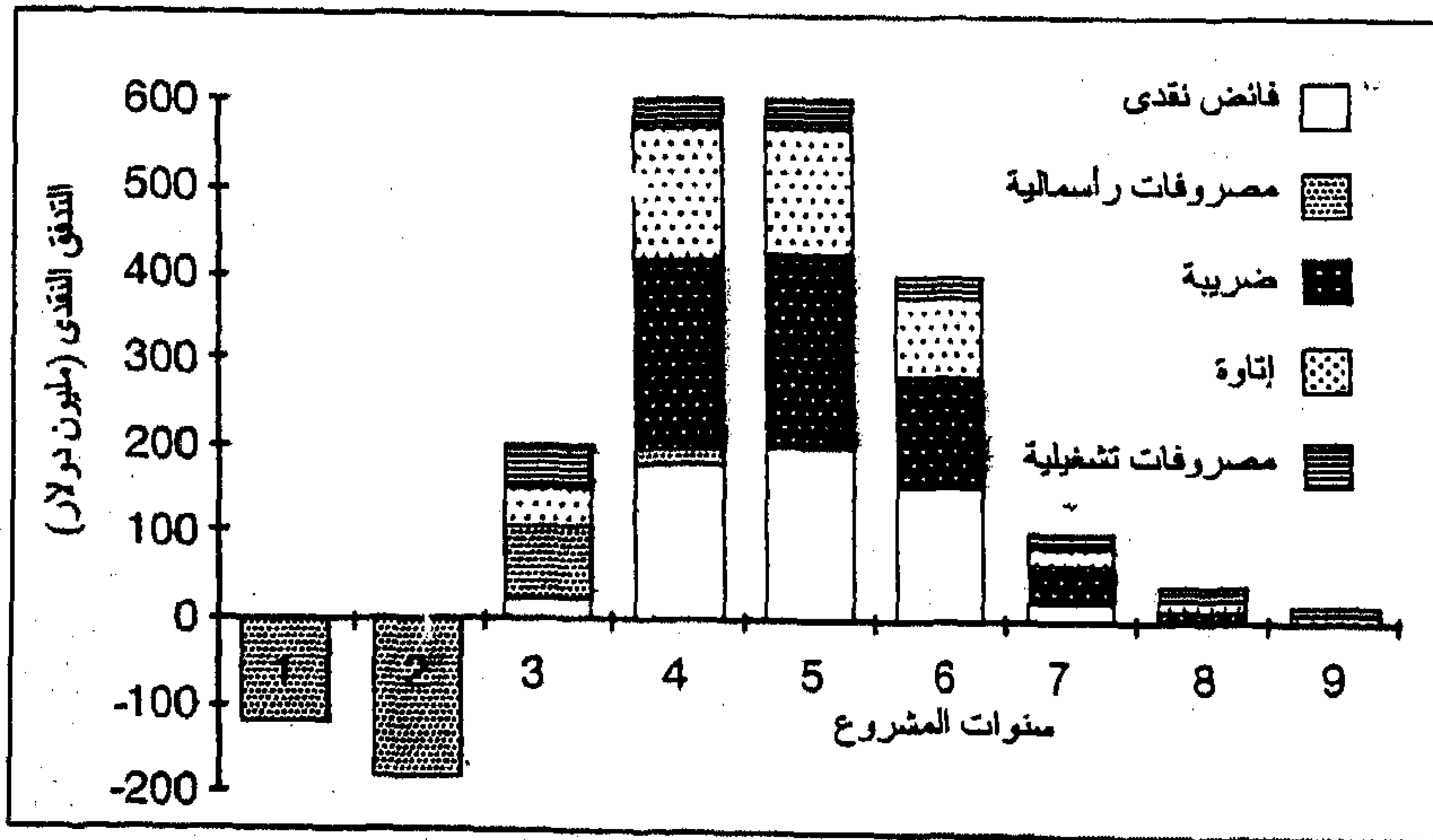
الضريبة المستحقة = الدخل الخاضع للضريبة (دولار) × معدل الضريبة (٪)

ويجري تحصيل الإتاوة من تاريخ بدء الإنتاج، أما الضريبة فإنها تكون مستحقة السداد عندما يتوافر دخل (موجب) خاضع للضريبة، وعند بداية أي مشروع فإن التكاليف المالية قد تفوق الإيرادات مما يتسبب في دخل (سالب) خاضع للضريبة، وفي جميع الحالات فإن كل ذلك يتوقف على الوضع المالي والمشروع القائم. والشكل ٢٩-٢ يبين تجزئة لبرميل الزيت في نظام الضريبة والإتاوة، حيث تتحدد التكاليف المالية والإيرادات الخاضعة للضريبة. ولتوضيح حركة التدفق النقدي في نظام الإتاوة والضريبة فإن ذلك يمكن أن يتم بيانياً كما هو موضح بالشكل ٢٩-٣ حيث نلاحظ المكونات المختلفة مثل

الفائض النقدي والمصروفات الرأسمالية والضريبة والإتاوة ومصاريف التشغيل بنسبها خلال الفترة الزمنية للمشروع.



شكل ٢٩-٢: تجزئة برميل الزيت الخاضع لنظام الضريبة والإتاوة.

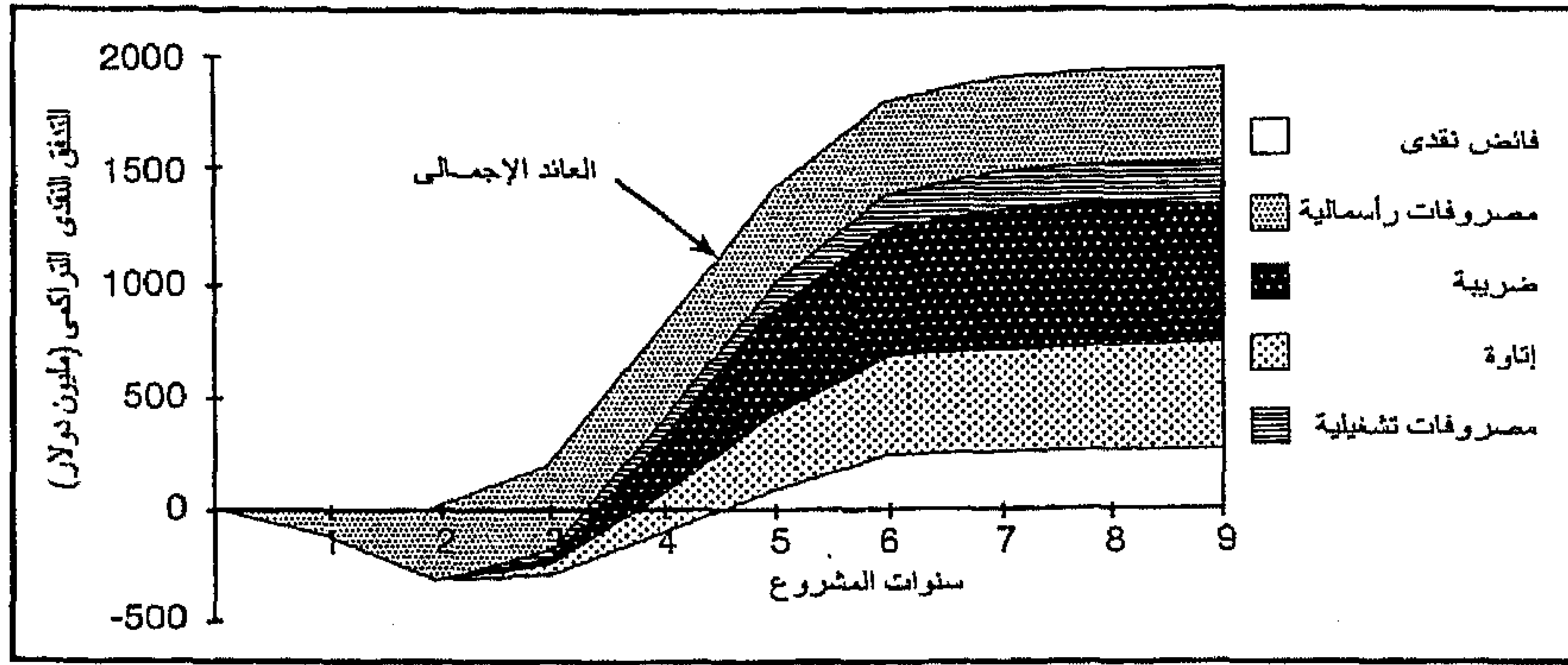


شكل ٢٩-٣: المكونات الأساسية للتدفق النقدي للمشروع.

كذلك فإنه يمكن أيضاً تمثيل هذه الحركة عن طريق التدفق التراكمي كما هو موضح بالشكل ٢٩-٤، ومن خلال مكونات هذا التدفق يتبين لنا الدخل الإجمالي من المشروع، ويعرف إجمالي المبالغ المالية للمستثمر (الشركة) عند نهاية المشروع بالفائض النقدي التراكمي cumulative cash surplus أو ما يسمى تحديداً بصافي التدفق النقدي للحقل المنتج field life net cash flow. والجدول ٢٩-٣ يوضح مثالاً لحساب التدفق النقدي في مشروع لأحد حقول البترول.

جدول ٢٩-٣: مثال لحساب فائض التدفق النقدي في مشروع لأحد حقول البترول.

الإنتاج السنوي: ٢٠ مليون برميل		
سعر برميل الزيت : ٨٠ دولاراً		
المصروفات الرأسمالية: ٣٧٥ مليون دولار		
المصروفات التشغيلية: ٢٥٠ مليون دولار		
معدل الإتاوة (٢٠٪)		
معدل الضريبة (٧٥٪)		
التضخم: ٢٥٠ مليون دولار		
الإيرادات = الإنتاج × سعر برميل الخام= ١٠^٦×٢٠×٨٠ =		١٦٠٠ مليون دولار
الإتاوة (٢٠٪ من الإيرادات)	٣٢٠ مليون دولار	
المصروفات التشغيلية	٢٥٠ مليون دولار	
التضخم:	٢٥٠ مليون دولار	
إجمالي الخصومات المالية =		٨٢٠ مليون دولار
الدخل الخاضع للضريبة:		٧٨٠ مليون دولار
الضريبة (٧٥٪ من الإيراد الخاضع للضريبة) =		٥٨٥ مليون دولار
الأرباح بعد الضريبة:		١٩٠ مليون دولار
التدفق النقدي للداخل cash-in = الإيرادات		١٦٠٠ مليون دولار
المصروف الرأسمالية	٣٧٥ مليون دولار	
المصروفات التشغيلية	٢٥٠ مليون دولار	
الإتاوة:	٣٢٠ مليون دولار	
الضريبة	٥٨٥ مليون دولار	
التدفق النقدي للخارج cash-out	١٥٣٠ مليون دولار	
فائض التدفق النقدي cash surplus	٧٠ مليون دولار	



شكل ٢٩-٤: التدفق النقدي التراكمي للمشروع.

(٢) نظام اقتسام الإنتاج:

بينما يكون نظام الضريبة والإتاوة هو الشائع في عدد من البلدان هناك نظام آخر تنامى في الآونة الأخيرة وهو نظام اقتسام الإنتاج production sharing system ويعرف بين المتخصصين بالنموذج الإندونيسي، وقد أوضحنا من قبل بعضاً من ملامحه، وبناء على هذا النوع من الاتفاقيات بين الحكومات المضيفة والشركات المستثمرة تدخل الأطراف المعنية في التزامات وارتباطات فيما بينها (تشمل مراحل الاستكشاف والتقييم والإنتاج والتنمية) ويسمى المستثمر في هذه الحالة المقاول contractor وتكون له حصة متفق عليها من الهيدروكربون المنتج، وعادة ما يتحمل المقاول كل مصروفات الاستكشاف والتقييم والتنمية وله الحق في استردادها في وقت لاحق من حصة الزيت أو الغاز المنتج والذي يطلق عليه زيت التكلفة cost oil، وعادة ما يكون ذلك في حدود ٤٠٪ من الزيت المنتج، وعندما تنتهي عملية الاسترداد يصبح الزيت المخصص لهذه العملية إما ملكا للحكومة أو مقسماً بين الحكومة والمقاول.

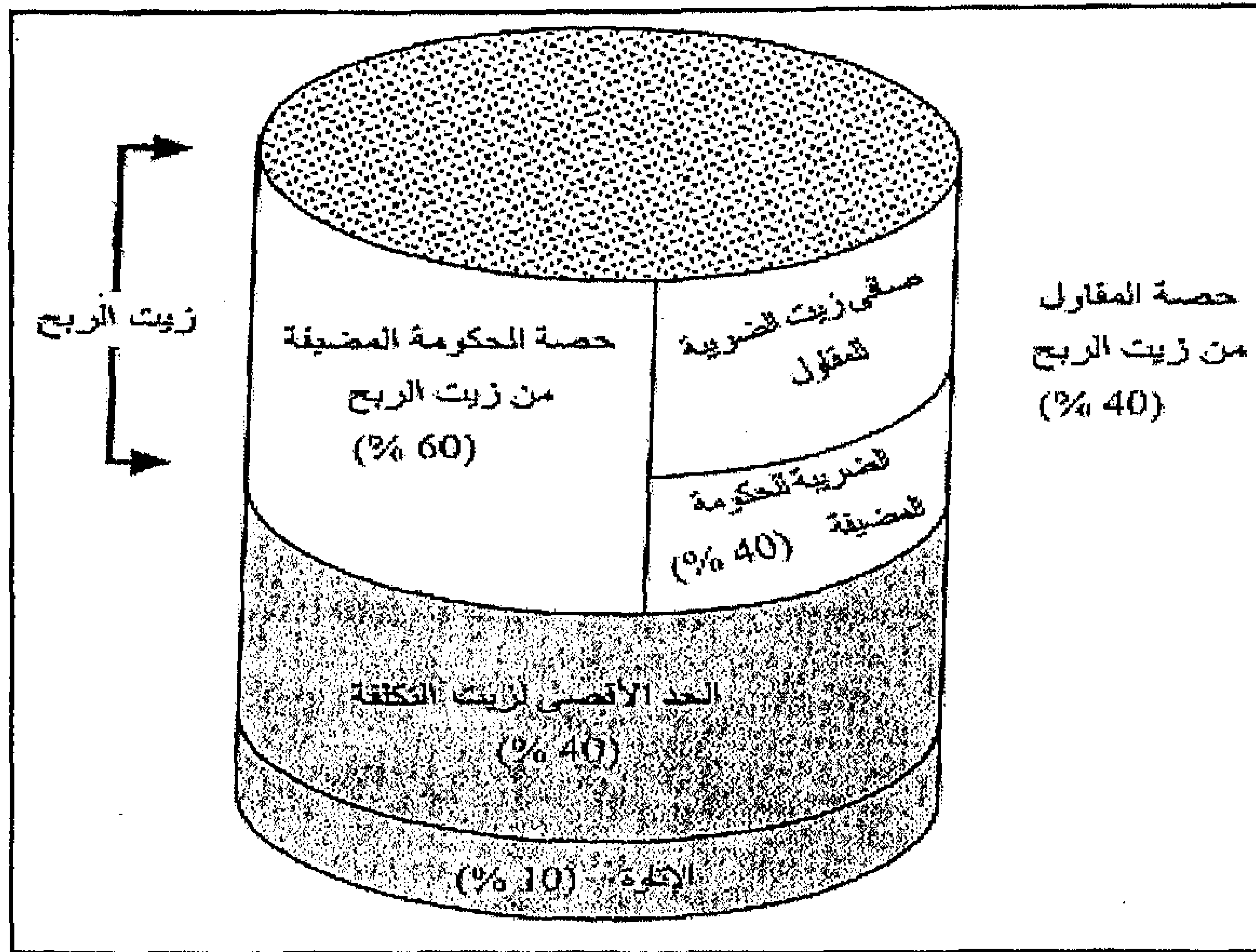
أما الـ ٦٠٪ من الزيت المنتج تسمى بزيت الربح profit oil وهو زيت اقتسام الإنتاج والذي يقسم بين الأطراف المعنية بنسب يتفق عليها وتختلف من اتفاقية لأخرى، وربما وصلت إلى ٧٥٪ للحكومة المضيفة و٢٥٪ للمقاول وربما خفضت هذه النسبة للمقاول إلى حوالي ١٠٪ - ١٢٪ عند بلوغ سقف إنتاج معين يكون في مصلحة تلك الحكومة، والجدول ٢٩-٤ يوضح مثالاً لأهم البنود الواردة في أربع اتفاقيات أبرمتها الحكومة المصرية مع شركة شل ضمن نظام اقتسام الإنتاج بالنسبة لعدد من المناطق البحرية والبرية.

وتسترد الشركات عادة ما أنفقته على عمليات البحث في مدة مقدارها خمس سنوات أي بواقع ٢٠٪ من هذه النفقات سنوياً، ونفس الشيء بالنسبة لنفقات التنمية، أما نفقات التشغيل فإنها تسترد عادة في سنة إنفاقها أو في أول فرصة سانحة للاسترداد.

جدول 29-4: مثال يوضح أهم بنود اتفاقيات الإمتياز التى أبرمتها الحكومة المصرية وشركة شل ضمن نظام اقتسام الإنتاج بالنسبة لعدد من المناطق البحرية والبرية.

منطقة الإمتياز	الالتزام الكلى	مدة البحث الأولى	مدة البحث الثانية	مدة البحث الثالثة	منح التوقيع	منح الإنتاج	فترة التنمية	استرداد مصروفات الاستكشاف والتنمية	نسبة استرداد النفقات	حصص اقتسام الإنتاج	نسبة الزيت الخام الفائض
خليج السويس الشرقية (نشاط بحرى) 1974	8 سنوات 26 مليون دولار	4 سنوات 12 مليون دولار	2 سنة 8 مليون دولار	2 سنة 6 مليون دولار	7.5 مليون دولار	مليون دولار الاكتشاف التجارى 2 مليون دولار (50 ألف ب/ى) 3 مليون دولار (100 ألف ب/ى) 6 مليون دولار (100 ألف ب/ى)	20 سنة + 10 سنوات	20٪ استكشاف+ 20٪ تنمية	٪40	32.5٪ (للحكومة) هيئة البترول المصرية 17.5٪ (للمقاول)	100٪ للحكومة المصرية
سترة (الصحراء الغربية) (نشاط برى) 1979	8 سنوات 83 مليون دولار	4 سنوات 23 مليون دولار	2 سنة 25 مليون دولار	2 سنة 35 مليون دولار	2 مليون دولار	مليون دولار الاكتشاف التجارى مليون دولار (50 ألف ب/ى) 2 مليون دولار (100 ألف ب/ى)	20 سنة + 10 سنوات	20٪ استكشاف+ 20٪ تنمية	٪40	0-100 ألف ب/ى 75٪ للحكومة المصرية 25٪ شل (المقاول) حتى 200 ألف ب/ى 77.5٪ للحكومة المصرية 22.5٪ شل (المقاول) أعلى من 200 ألف ب/ى 80٪ للحكومة المصرية 20٪ شل (المقاول)	80٪ للحكومة المصرية 20٪ لشركة شل
بدر الدين (الصحراء الغربية) (نشاط برى) 1980	8 سنوات 28 مليون دولار 4 آبار	4 سنوات 10 مليون دولار بئران	2 سنة 8 مليون دولار بئر واحدة	2 سنة 10 مليون دولار بئر واحدة	نصف مليون دولار	مليون دولار الاكتشاف التجارى مليون دولار (50 ألف ب/ى) 2 مليون دولار (100 ألف ب/ى)	20 سنة + 10 سنوات	20٪ استكشاف+ 20٪ تنمية	٪40	نفس حصص اقتسام الإنتاج بالاتفاقية السابقة	80٪ للحكومة المصرية 20٪ لشركة شل
قارون (الصحراء الغربية) (نشاط برى)	7 سنوات 36 مليون دولار 6 آبار	3 سنوات 12 مليون دولار بئران	2 سنة 12 مليون دولار بئران	2 سنة 12 مليون دولار بئران	2 مليون دولار	2 مليون دولار (50 ألف ب/ى) 2.5 مليون دولار (100 ألف ب/ى) 5 مليون دولار (150 ألف ب/ى)	20 سنة + 10 سنوات	20٪ استكشاف+ 20٪ تنمية	٪40	0-75 ألف ب/ى 80٪ للحكومة المصرية 20٪ لشركة شل حتى 150 ألف ب/ى 82.5٪ للحكومة المصرية 17.5٪ لشركة شل أعلى من 150 ألف ب/ى 85٪ للحكومة المصرية 15٪ لشركة شل	100٪ للحكومة المصرية

والشكل ٢٩-٥ يوضح رسماً تخطيطياً لتقسيم الحصص في نظام اقتسام الانتاج لبرميل الزيت الخام



شكل ٢٩-٥: تجزئة برميل الزيت المنتج بين الحكومة المضيفة والشريك الأجنبي.

حيث إن:

صافي التدفق النقدي للمقاول = الدخل – المصروفات.

= زيت التكلفة + صافي ضريبة زيت الربح – المصروفات الرأسمالية – مصروفات التشغيل

صافي التدفق النقدي للحكومة = الإتاوة + الضريبة + حصة الحكومة من زيت الربح.

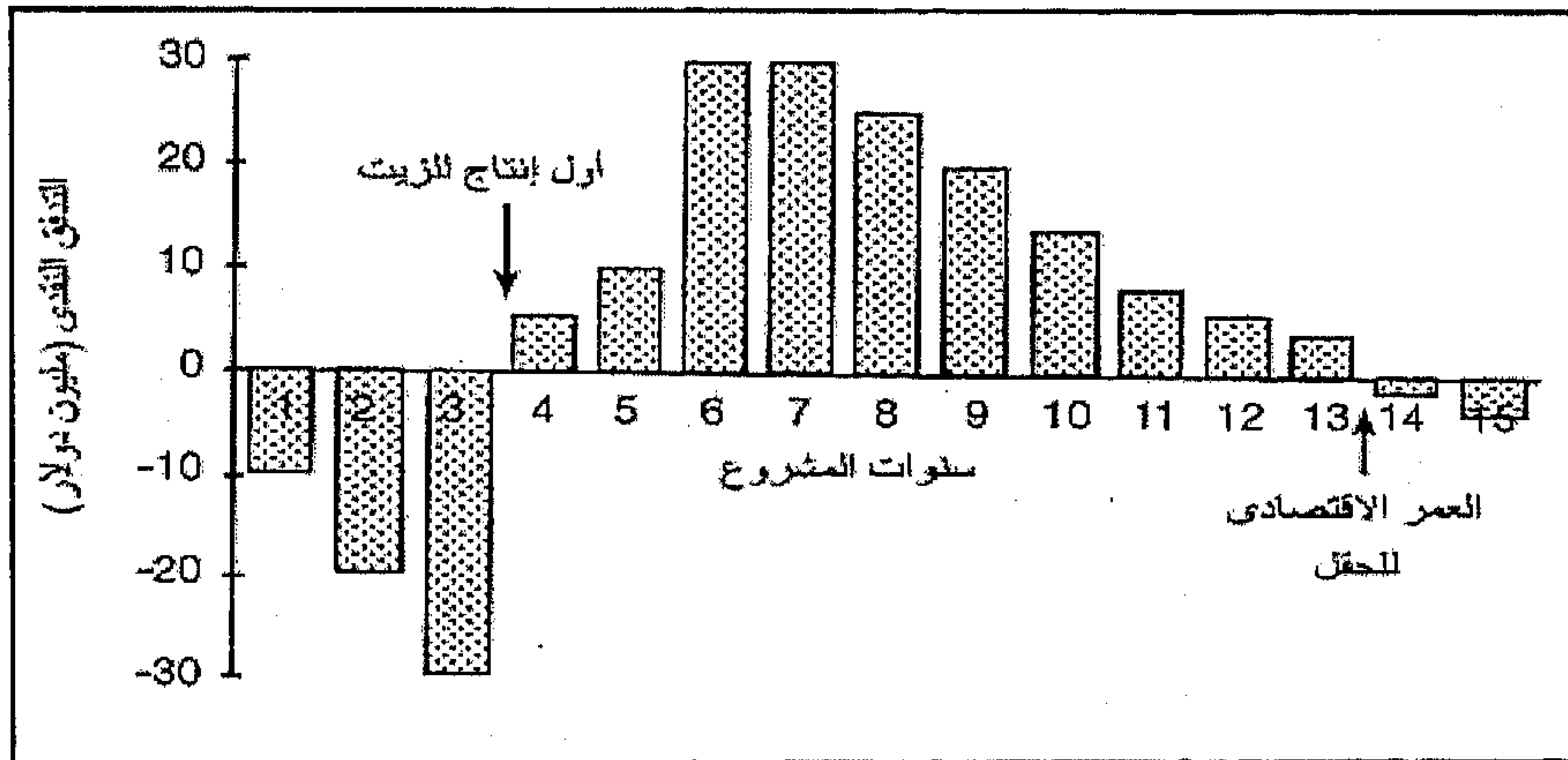
مؤشرات الربحية:

من دراسة منخنيات التدفق النقدي يمكن تحديد عدد من المؤشرات الاقتصادية التي تعكس مدى ربحية المشروع profitability indicators، فبالإضافة إلى تحديد العمر الافتراضي للحقل المنتج، فإن تحول التدفق النقدي إلى قيمة سالبة بصورة مستمرة هو راجع إلى تدهور الإيرادات وتكون قيمة التدفق أقل كثيراً من نفقات التشغيل مما يعرض المشروع إلى التوقف، كذلك فإن اليوم الأول للإنتاج يعتبر علامة فارقة milestone في تاريخ المشروع، ويفسر على أنه بداية الإيرادات، وعند هذا التاريخ يتحول التدفق النقدي إلى مسار موجب، أما تلك النقطة ذات السلبية الكبرى على منحنى التدفق التراكمي فتمثل أقصى تعرض نقدي للمشروع maximum cost exposure، وتعني هذه النقطة

التي تشبه البالوعة sink تعرض المستثمر لأكبر الخسارة وربما أصبح من الضروري هجر المشروع، ناهيك عن المخاطر والتداعيات الأخرى المرتبطة بالتزامات التعاقد والجزاءات والمطالبات من جانب المساهمين والمقاولين على حد سواء، أما النقطة التي يبدأ عندها المنحنى التراكمي في التحول إلى قيمة موجبة فهي أيضاً مؤشر مهم حيث يحدد تاريخ بدء استرداد النفقات payout time وعندها تتساوى قيمة الإيرادات مع رأس المال المستثمر، هذا ويطلق على فائض النقد التراكمي للمستثمر عند نهاية العمر الاقتصادى للمشروع ما يعرف بالفائض الصافي للتدفق النقدي للحقل field life net cash flow.

كذلك فمن المؤشرات الاقتصادية ما يعرف بنسبة الربح إلى حجم الاستثمار profit-to-investment ratio (PIR) وهي حجم الفائض النقدي المتراكم إلى رأس المال المستثمر وتمثل العائد المالي من الاستثمار والذي يصل في المشروعات الكبيرة إلى ملايين الدولارات.

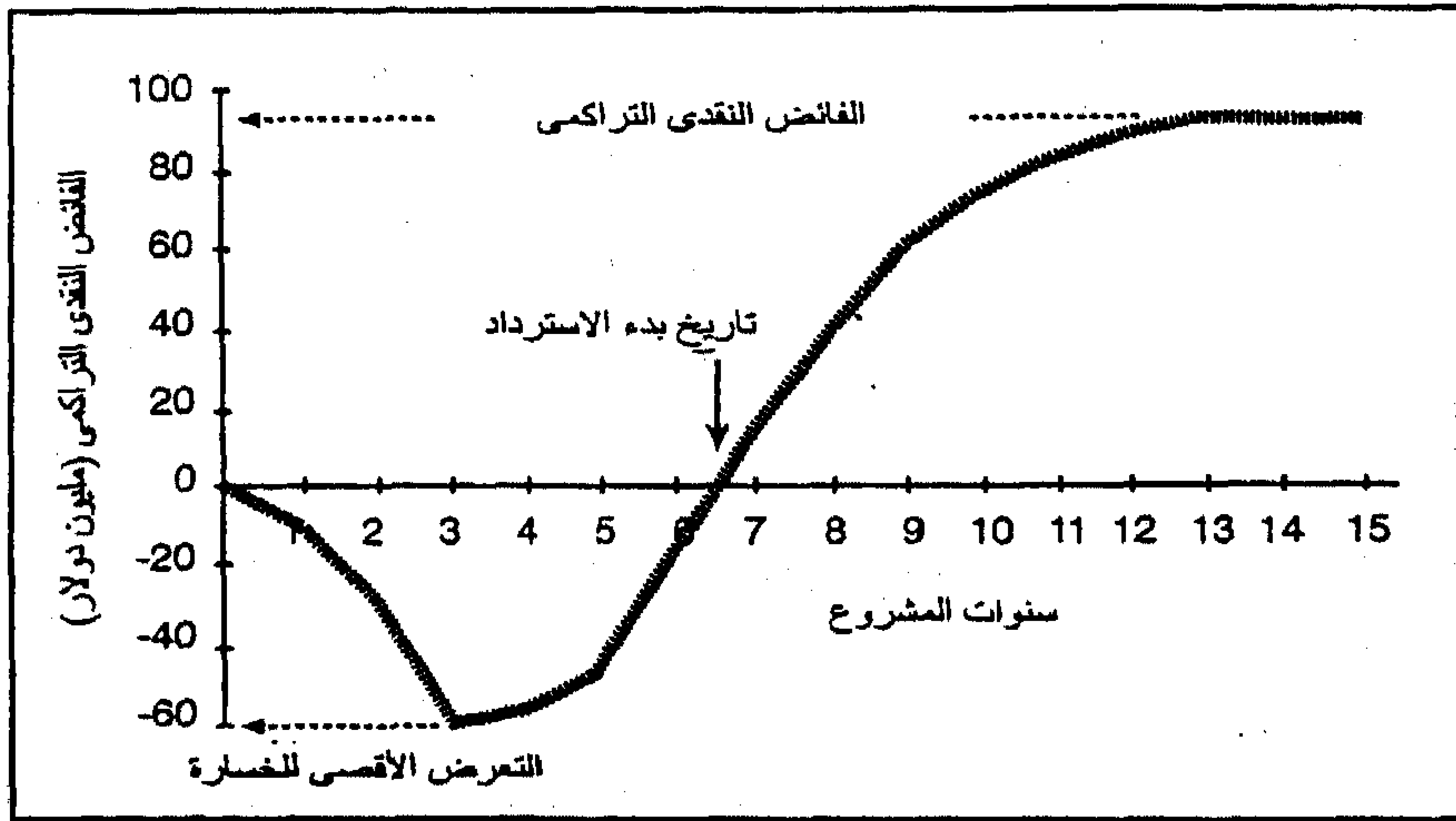
ويبين الشكلان ٢٩-٦ و٢٩-٧ المؤشرات الاقتصادية من منحنيات التدفقات النقدية وتلك التراكمية، حيث يحدد الشكل ٢٩-٦ تاريخ بدء الإنتاج وكذا الحد أو العمر الاقتصادى للحقل المنتج، ويوضح الشكل ٢٩-٧ فائض النقد التراكمي والتعرض الأقصى وكذا وقت بدء استرداد النفقات.



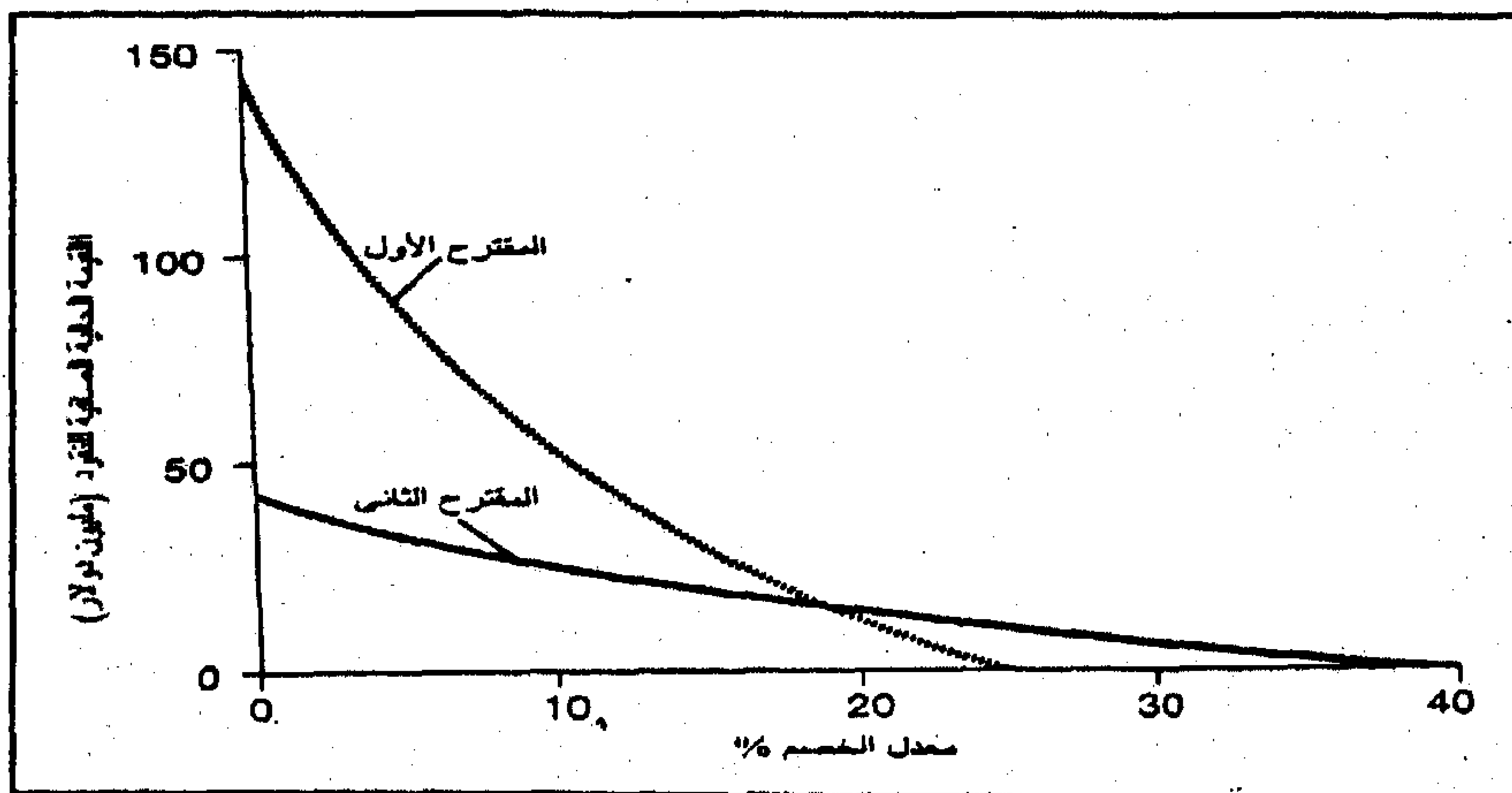
شكل ٢٩-٦: تحديد المؤشرات من صافي التدفق النقدي السنوي.

وعادة ما تتبع منحنيات التدفق النقدي في مجالات البترول وإنتاجه أنماطا خاصة بها، ففي السنوات الأولى من المشروع تتزايد النفقات الرأسمالية وتكون قيمة التدفق النقدي سالبة مشيرة إلى عجز في التدفق النقدي cash deficit، ثم يلي ذلك عدد من الفوائض

النقدية cash surplus الموجبة التي تحققت من نجاح المشروع وتدفق الإيرادات، وبالطبع فإن التدفق النقدي السنوي يكون في حاجة إلى التقييم وتحديد الأزمنة المختلفة ومعرفة مدى تأثير عامل الوقت على القيمة النقدية، كما يجري ما يعرف بالخصم على التدفقات النقدية discounting وهو أمر لابد منه حيث إن القيمة الحالية للنقود net present value (NPV) سوف تختلف عن مثيلاتها في فترة سابقة، وهناك أساليب تجرى في هذا الشأن لوضع معدل الخصم discount rate وبالتالي تحديد القيمة الحالية للنقود لكل تدفق نقدي سنوي وعند تاريخ معين، ويمكن للقارئ الاستعانة بالمراجع المتخصصة للمزيد من المعرفة في هذا الشأن.



شكل ٢٩-٧: مؤشرات ودلالات التدفق النقدي التراكمي.



شكل ٢٩-٨: تعلية منزلة المشروع باستخدام القيمة الحالية للنقود.

ولضمان ربحية المشروع وإدراك أدائه الاقتصادى المرتقب يطبق المستثمرون عادة ما يعرف بالقيمة الغربلية أو التصفوية screening value للمشروع حيث يتم اختيار معدل مناسب للعائد return rate من المشروع عند سعر معين للخام (مثلاً ٢٠٪ معدل عائد عند ٥٠ دولاراً للبرميل من الزيت) فإذا ما تخطى هذا المعدل المرتبة ranking أو العتبة threshold المفترضة كان المشروع مقبولاً وإلا تم رفضه، كذلك فإن المستثمر يقوم أيضاً بعملية ترقية وتصعيد لمنزلة ومكانة المشروع إذا كان لديه أكثر من بديل وكان عليه الاختيار فيما بينها في ضوء موارده المحددة وترشيد النفقات، ويمكن أن يتم له ذلك من خلال منحنيات معدلات التخصيم وصافي القيمة الحالية للنقود كما هو موضح بالشكل ٨-٢٩. وفي هذا المثال نجد أنه عند معدل خصم أقل من ١٨٪ يكون المقترح الأول هو الأفضل بالنسبة للقيمة الحالية للنقود بينما يكون المقترح الثاني هو الأكثر جاذبية عند معدلات خصم أعلى من ١٨٪، وتكون القيمة الحالية للنقود هي الأداة المستخدمة في إدراك مكانة المشروع وأولويته في الإنجاز.

تكلفة برميل الزيت:

تعرف هذه التكلفة بأنها النسبة بين مجموع المصروفات الرأسمالية ومصروفات التشغيل إلى حجم الإنتاج حسب المعادلة الآتية:

تكلفة برميل الزيت (دولار) = المصروفات الرأسمالية + مصروفات التشغيل/ كمية الإنتاج

ويكون من الأفضل حساب هذه التكلفة من القيم المخصصة للبنود السابقة كما يلي:

تكلفة البرميل (القيمة الحالية للنقود بالدولار) = (القيمة الحالية للمصروفات الرأسمالية + القيمة الحالية لمصروفات التشغيل) / القيمة الحالية للإنتاج

تحليل الحساسية:

من الأمور اللازمة عند التعامل مع التدفقات النقدية معرفة مدى حساسية المشروع وأدائه الاقتصادي، ذلك أن البيانات المدخلة سواء أكانت الفنية أو المالية أو الاقتصادية التي تم استخدامها في بناء منحنيات التدفق تحمل في العادة بعض الريبة والغموض،

وبالتالي فإن الأداء الاقتصادى للمشروع يكون عُرضة للتعديل لما قد يطرأ عليه من متغيرات، ومن ثم وجب إجراء تحليل للحساسية sensitivity analysis ومقارنة ذلك بالحالة القاعدية التي استند اليها التصور النقدي، فقد يحدث مثلاً أن يكون للتأخر في بدء الإنتاج حساسيته البالغة في الأداء الاقتصادى مما قد يستدعي مراجعة بنود المشروع وإعادة جدولتها لضمان الحصول على العائد المالي أو على الأقل الإبقاء على الحد الأدنى للربحية المأمولة.

ومن بين المعالم (البارمترات) التي قد تتباين في اختبارات الحساسية ما هو فني مثل : المصروفات الرأسمالية ومصروفات التشغيل وحجم الاحتياطي والتنبؤات الإنتاجية، ومنها ما هو اقتصادي مثل : معدلات الخصم وتوقيت المخصصات المالية وسعر البترول والتضخم.

وإذا كان النظام المالي قابل للتفاوض فإن حساسية المشروع للبيانات المدخلة سوف تكون ملائمة عند التحضير للمناقشة مع الحكومة المضيفة، وبالطبع فإن المؤشرات الاقتصادية سوف يكون لها وزنها في المقام الأول بالنسبة للمشروع قيد المناقشة.

اقتصاديات النشاط الإستكشافي والمخاطرة:

تعرضنا آنفاً لإقتصاديات تنمية الحقول والبارمترات ذات الحساسية في هذا الشأن، وفي هذه الأحوال لا توجد مخاطرة بالنسبة لوجود البترول من عدمه فالكشف البترولي قد تحقق بالفعل وأن ثمة احتياطياً قد تأكد إثر الإعلان التجاري له. أما عند التعرض لاقتصاديات مرحلة الاستكشاف فهذا شيء آخر ذلك أن عامل المخاطرة قائم وأن نسبة النجاح في تحقيق الهدف قد لا تكون كبيرة وربما بلغت في المتوسط ١ : ١٠ (أي بئر منتجة من بين عشرة آبار تم حفرها)، ومن ثم فإن التقديرات لمعرفة حجم المخزون والاحتياطي البترولي يشوبها الكثير من الريبة والهواجس، وربما كانت كل هذه التقديرات غير صحيحة على الإطلاق، فهي في مجملها تعتمد على نظرية الاحتمالات ومن ثم كان افتراض قيم متباينة (قيمة صغرى low وقيمة متوسطة middle وقيمة كبرى high) وتنطلق هذه التقديرات من التكلفة الهندسية والتنبؤات الإنتاجية وعلى ضوء ذلك يتحدد نوع التسهيلات الإنتاجية المستقبلية.

وتكون القيمة النقدية المتوقعة expected monetary value (EMV) في مرحلة الاستكشاف على النحو التالي:

(EMV) = احتمالية النجاح × العائد الصافي – (١ – احتمالية الفشل) × نفقات الاستكشاف.

وللاستمرار في النشاط الاستكشافي لابد أن تكون القيمة النقدية المتوقعة موجبة.

شجرة القرار:

بناء على ما سبق مناقشته يمكن القول إن اقتصاديات البترول تتباين في طبيعتها حسب مرحلة النشاط وما إذا كان نشاطاً استكشافياً أم إنمائياً، ذلك أنه في جميع الأحوال يكون حجم النفقات كبيراً للغاية، ومن ثم وجب الدراسة المتأنية قبل اتخاذ القرار، فالغموض والمخاطرة قائمان ويتطلبان الحيطة والحذر، ومن ثم كان من المفيد الإجابة عن الأسئلة الأساسية الآتية:

- هل نجري عمليات البحث والاستكشاف بالمنطقة ؟ وهل لدينا الموارد الفنية والمالية لذلك؟
- وإذا ما تم لنا اكتشاف الهيدروكربون ... هل نشرع في تقييم هذا الكشف؟
- وبعد هذا التقييم.. هل نبدأ في مرحلة التنمية ؟ وهل لدينا المبررات والدوافع القوية إلى ذلك؟

وفي هذا الصدد يكون لما يسمى شجرة القرار decision tree فائدتها كأداة جيدة في تحليل البيانات وتتبع الخطوات اللازم اتخاذها والقرارات التالية لها وكذا المخرجات outputs المحتملة لتحقيق القيمة النقدية المتوقعة (EMV)، ولعل في المثال الآتي نموذجاً مبسطاً لتحديد الاختيار المناسب للحصول على القيمة النقدية الموجبة للمشروع كما هو موضح بالشكل ٢٩-٩.

شكل ٢٩-٩: شجرة القرار في استكشاف وتنمية الحقول.

وبالطبع فإن توافر البيانات حول وجود الصخر المصدري للبترول في المنطقة قيد البحث ودرجة نضج الخام وخصائص الصخر الخزان وكفاءة الإغلاق والمصيدة البترولية تكون لها أهميتها في إدراك التوقعات والاحتمالات المستقبلية للكشف البترولي من زيت وغاز طبيعي، كذلك فإن النجاح من الناحية الفنية ليس بالضرورة أن يكون نجاحاً تجارياً، لذا كان التقييم الاقتصادى عند القيم الصغرى والمتوسطة والعالية التي أشرنا إليها بداية مناسبة للتعامل قبل اتخاذ القرار.

الفصل الثلاثون

نهاية المطاف وإخلاء الحقل

بعد أن يفرغ الحقل من إنتاجه سواء عن طريق الإنتاج الأولي له أو بعد استنفاد عمليات الاستخلاص اللاحقة يكون الحقل قد فقد حياته الإنتاجية ووصل إلى نهاية المطاف، فالعمر الافتراضي قد ولى والعائد الاقتصادى لا يغطي بأي حال من الأحوال التكلفة التشغيلية، أي لا ربحية على الإطلاق.. بل ربما كانت هناك خسارة تعجل من التخطيط والحصول على الموافقات المطلوبة لإزالة المنشآت القائمة والتخلص منها أو إعادة استخدامها في مواقع واحتياجات أخرى.

وعملية الإزالة ليست بالسهولة التي يتصورها البعض، بل ربما تكون معقدة ومحفوفة بالمخاطر حيث تبرز خمسة إعتبارات أساسية لابد من إدراكها وهي: التأثير البيئي المحتمل، التأثير المحتمل على صحة الإنسان وسلامته، القابلية للتنفيذ، تكاليف الخطة، والتقبل العام.

ويمكن لنشاط الإزالة أن يتم بعدة وسائل وذلك حسب نوعية المنشآت القائمة والموقع الإنتاجي، وسوف نعرض في هذا الفصل الطرق التي يمكن بواسطتها إرجاء هذا النشاط وإطالة عمر الحقل لبعض الوقت ثم نأتي بعد ذلك إلى الطرق الرئيسة لهجر الآبار وإزالة التسهيلات الحقلية.

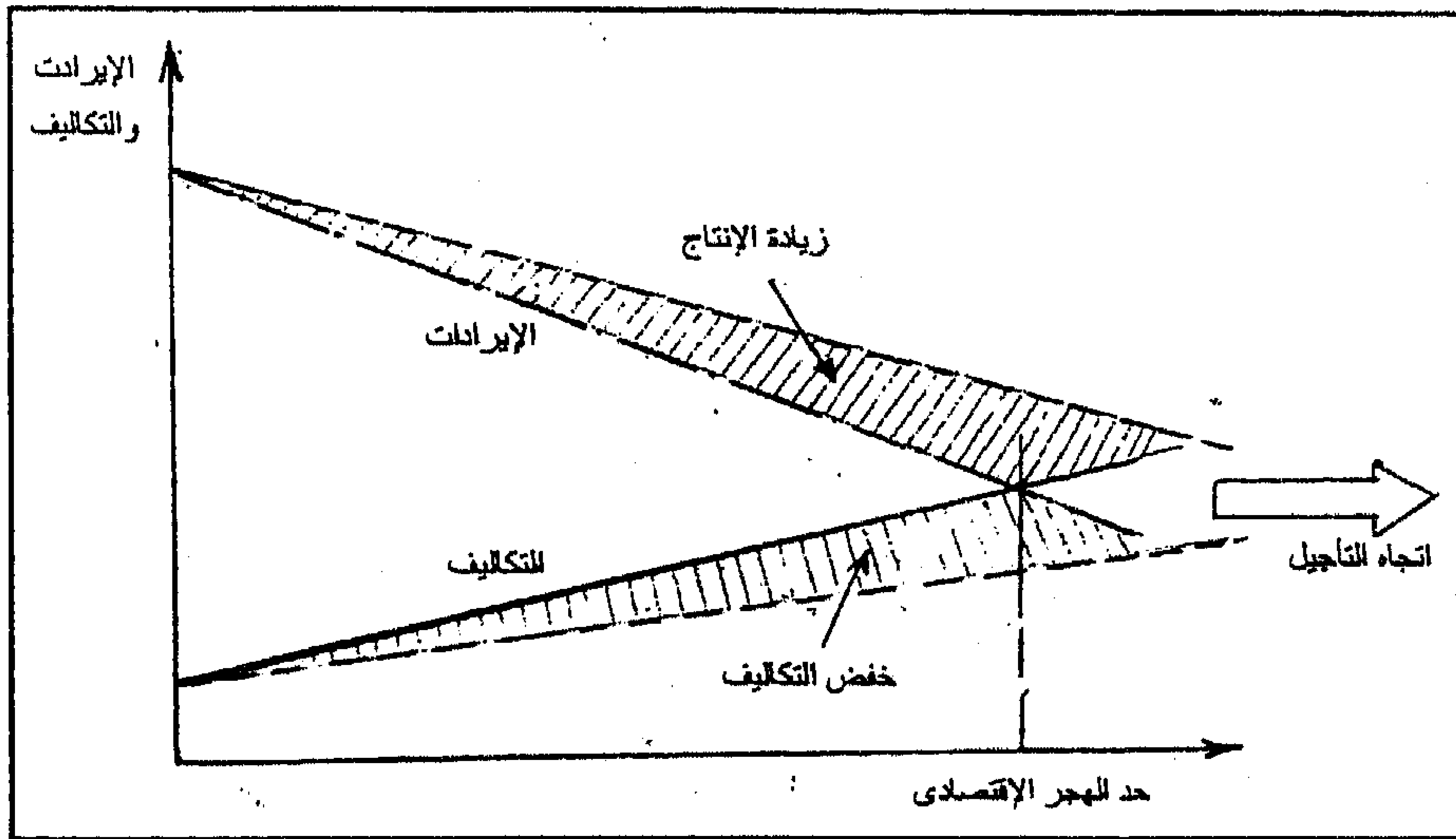
الجوانب التشريعية لعمليات إزالة المواقع:

تقوم الحكومات المحلية بدور واسع في تقييم وإصدار التراخيص بشأن اختيارات الإزالة، وأغلب الدول التي لها منشآت وتركيبات بحرية خاصة بإنتاج الزيت والغاز الطبيعي لديها قوانين لإدارة ومراقبة نشاط الإزالة، وتعتبر المنظمة الدولية للنقل البحري International Maritime Organisation (IMO) هي الهيئة الأولى التي تضع الضوابط والخطوط الإرشادية والقياسية لكيفية إزالة المنشآت البحرية، وتنص الإرشادات على ضرورة الإزالة الكاملة من الموقع للمنشآت الموجودة عند عمق أقل من ٧٥ متراً وتتضمن منشآت وتركيبات قاعدية تقل في وزنها عن ٤٠٠٠ طن، أما تلك الموجودة في مياه أعمق فلا بد من إزالتها حتى عمق ٥٥ متراً تحت السطح للحيلولة دون إحداث أضرار

للملاحة البحرية، غير أنه في بعض البلدان تكون الإزالة للمنشآت حتى عمق ١٠٠ متر. ولا تتم الإزالة بين عشية وضحاها فقد تتطلب الأنشطة التخطيطية لها فترات زمنية تجري خلالها نقاشات مع السلطات المحلية والأطراف المعنية مثل جماعات الصيد وحماية البيئة.

العمر الاقتصادى للحقل:

يمكن تعريف العمر الاقتصادى للحقل economic lifetime بأنه النقطة التي عندها تتحول التدفقات النقدية السنوية إلى قيم سالبة على الدوام، وهو الحد الذي عنده يصبح العائد من الإنتاج غير قادر تماماً على تجاوز نفقات الإنتاج، ومن ثم ضرورة اتخاذ القرار بإخلاء الموقع، حيث لا يتبقي عندئذ أي معني اقتصادي لتبرير الاستمرار في إنتاج الحقل، إلا أنه من الناحية الفنية يمكن للإنتاج أن يستمر خارج إطار تلك النقطة مع تقبل خسارات مالية محتملة، وفي هذا الصدد هناك طريقتان يمكن على أساسهما تأخير عملية الإخلاء وهما خفض النفقات التشغيلية أو زيادة الإنتاج من الهيدروكربون، وذلك كما هو موضح بالشكل ٣٠-١ ووفق الشرح التالي.



شكل ٣٠-١: كيفية تأجيل وترحيل موعد الإخلاء للحقل.

خفض التكاليف التشغيلية:

تمثل التكاليف التشغيلية operating costs في المراحل المتقدمة من حياة الحقل الإنتاجية الحجم الأكبر من المصروفات، والسبب في ذلك راجع إلى الزيادة المطردة في عدد

العاملين المنوط بهم إدارة التسهيلات والمنشآت الإنتاجية، وكذلك لضخامة حجم المعدات والتجهيزات المشاركة في العملية الإنتاجية مع الحفاظ في الوقت ذاته على سير النشاط حسب المواصفات المقررة وجودة المنتج مما يضيف عبئاً مالياً آخر، لذا كان من الضروري – وعلى فترات دورية – إعادة النظر بعناية في إستراتيجيات التشغيل وجودة المنتج، حيث يمكن مثلاً أن يؤثر قرار التوقف downtime عن الإنتاج في تدني الزيت مما يتطلب معالجات إضافية، كما أن تدفق الغاز gas influx في الآبار أمر غير مرغوب فيه ويلزم معالجته حفاظاً على إنتاجية الخزان وفق المعدلات المأمولة.

زيادة الإنتاج من الهيدروكربون:

عندما يقترب الإخلاء من موعده وبعد استنفاد كل الفرص لزيادة ورفع إنتاجية الآبار تبدو طرق الاستخلاص المحسن وسيلة فعالة لاستغلال ما تبقى من هيدروكربون داخل الخزان الجوفي، لكن علينا أن نتذكر بأن تطبيق هذه التقنيات له حساسيته وارتباطه بالنسبة لأسعار الزيت السائدة، وقد يكون لذلك تبرير بالنسبة للحقول البرية ولكنه قد لا يكون مبرراً في الحقول البحرية نظراً للتكلفة الهائلة.

وإذا كان الاستمرار في الإنتاج لا يغطي التكلفة التشغيلية ولكن ما زالت التسهيلات القائمة دون عمرها الافتراضي فإن مثل هذه المنشآت يمكن استغلالها والاستفادة منها في إنتاج احتياطيات جديدة بذات الحقل أو بالنسبة لاحتياطيات مجاورة خاصة إذا كانت محدودة ولا يمكن استغلالها بمفردها، وبالطبع فإن في ذلك فائدة مالية للشركات المالكة لهذه التسهيلات من منشآت إنتاجية وخطوط أنابيب وتعويض ما فقدته من عوائد مالية بسبب نضوب خزاناتها البترولية، ويمكن لهذه الشركات تأجير تلك المنشآت أو فرض تعريفة جمركية tarrif على الطرف الآخر المستفيد وفق اتفاقيات محددة.

تمويل عمليات الإخلاء:

إن تدبير مصروفات الإخلاء هي من المسائل التي قد تواجهها الشركات العاملة عندما يقتضي الأمر ذلك، وقد تكون هذه المصروفات مرتفعة إلى حد كبير وفي الحالات المثالية تمثل حوالي ١٠٪ من المصروفات الرأسمالية التراكمية للحقل، وفي المواقع البرية تسد الآبار ويتم تفكيك التسهيلات على مراحل، وذلك لتفادي مستويات إنفاق عالية

تقابلها عائدات متواضعة، كذلك فإن تكلفة الإخلاء في المواقع البحرية تكون باهظة للغاية خاصة وأن إزالة المنصات الإنتاجية هناك يتم دفعة واحدة وليس مرحلياً وهذا يتوقف على إمكانية الشركة المالكة وقدراتها المالية والتزاماتها الضريبية.

وإذا كان لدى الشركة المعنية عدد من المشروعات في مراحل إنمائية مختلفة يكون باستطاعتها حينئذ أن تقوم بالصرف على نشاط الإخلاء من العائد المالي الوارد إليها من حقولها المنتجة، أما إذا لم يكن للشركة إلا مشروع وحيد فبالطبع لن يكون أمامها الخيار السابق وعليها أن تعمل على تدبير التمويل اللازم لمصروفات الإخلاء بطريقتها الخاصة.

وتعتبر المعالجة المالية لتكلفة عمليات الإخلاء قضية حيوية في كثير من الحقول الهامشية والتي أوشكت على النضوب، وعلى عاتق إدارات الطاقة وهندسة البترول مسئولية ضمان استخلاص الزيت والغاز والحفاظ على هذه الأصول البترولية ذات الأهمية الاقتصادية، وتكون الشركة العاملة هي المسئولة أمام المساهمين والشركاء في تحقيق عائد اقتصادي مناسب من هذه الاستثمارات.

طرق الإخلاء:

الغرض الأساسي من برنامج الإخلاء decommissioning هو جعل كل الآبار المزمع هجرها والتخلي عنها في وضع آمن على الدوام وإزالة جل إن لم يكن كل أثر للنشاط الإنتاجي سواء أكان سطحياً أو تحت البحر، وكذلك الكيفية التي يمكن أن تعيد للموقع حالته "الخضراء" صديقاً للبيئة، وذلك استجابة لما توصلت إليه الأطراف المعنية (الحكومة المضيفة، الشركة العاملة، المجتمع المدني) من قرارات تهدف إلى حماية البيئة وسلامة البشر.

ويشمل برنامج الإخلاء البنود الرئيسة الآتية:

- **هجر الآبار:**

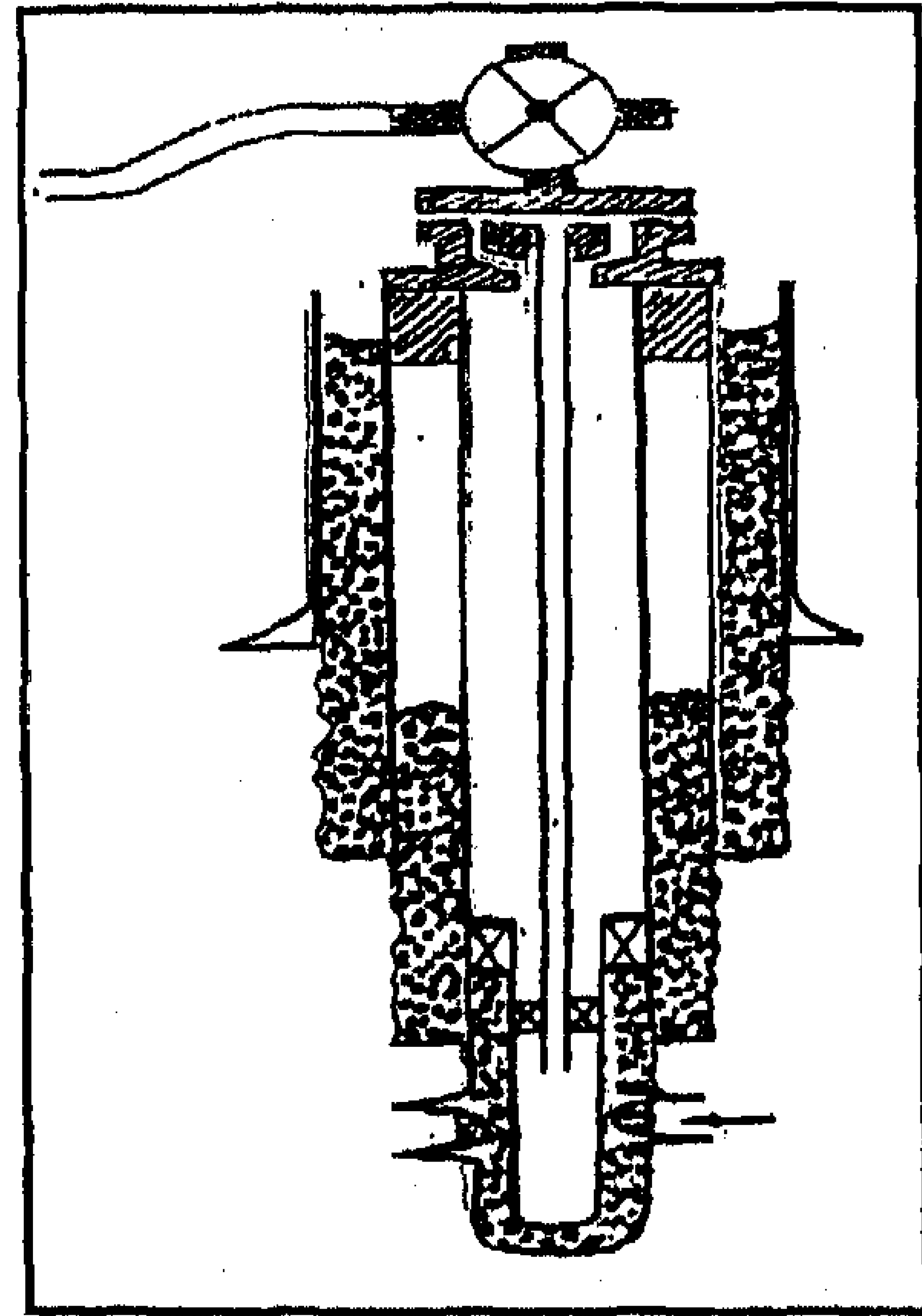
بالنسبة لأي بئر سواء أكانت بحرية أو برية أن يتضمن برنامج الهجر well abandonment المهام والإجراءات التالية:

- عزل جميع الطبقات الحاملة للهيدروكربون.
- احتواء النُّطق ذات الضغوط الفائقة.

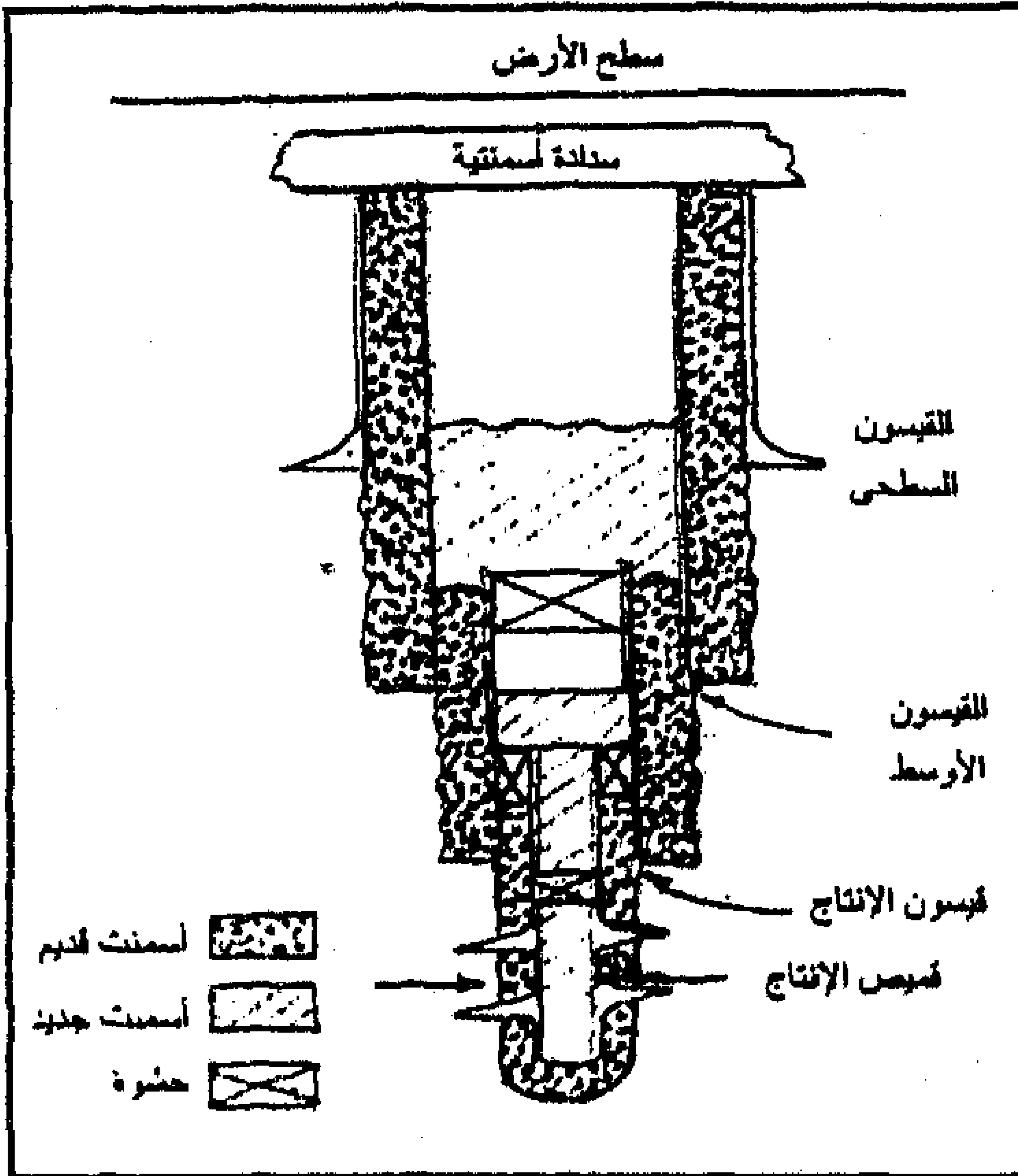
- حماية خزانات ومكامن المياه العذبة.

- إزالة تجهيزات رأس البئر.

وفي هذا الشأن يبدأ النشاط أولاً بقتل البئر well killing التي كانت منتجة حيث يتم إزالة الموائع الموجودة بالبئر واستبدالها بسائل الحفر الثقيل الوزن والذي يمكنه احتواء الضغوط داخل البئر، وإذا ما تمت عملية القتل فإن شجرة الإنتاج يمكن تفكيكها واستبدالها بجهاز منع التفجر والذي من خلاله يمكن سحب أنبوب الإنتاج، وعندئذ يوضع الأسمنت في مواجهة الثقوب المفتوحة مع كبس جزئي داخل التكوين لسد النُّطق المنتجة، وعلى حسب هيئة البئر يجرى تتابع من الأسمنت والسدادات السلكية داخل القيسون القاعي وقيسون الإنتاج (شكل ٣٠-٢) وحتى العمق المطلوب على أن تكون قمة الأسمنت خلف قيسون الإنتاج، ويتم بعد ذلك قطع هذا القيسون وإزالته فوق قمة الأسمنت ثم توضع بعدها سدادة أسمنتية داخل القيسون بغرض عزل الحيز الموجود وأي تكوين قد يكون ما زال مفتوحاً أسفل حذاء القيسون الأوسط، ويمكن تكرار هذه العملية بالنسبة للسلسلة المتبقية وذلك بقطعها وإزالتها ووضع سدادات من الأسمنت (شكل ٣٠-٣)، وتجدر الإشارة أنه في بعض الأحيان يتم هجر البئر دون الاستعانة بأجهزة الحفر وذلك بتثقيبها وكبسها دون قطع وسحب أنابيب الإنتاج والقيسون.



شكل ٣٠-٢: الوضع قبل هجر البئر.



شكل ٣٠-٣: الوضع بعد هجر البئر.

• **خطوط الأنابيب:**

يتم تنظيف جميع خطوط الأنابيب pipelines، أما بالنسبة لتلك الخطوط المدفونة أو الممتدة على قاع البحر فتترك مملوءة بالماء أو الأسمنت. وأما تلك الممدودة على سطح الأرض فيتم تقطيعها وإزالتها، وأما الخطوط البحرية المرنة فيتم لفها على مركب خاص ونقلها إلى الموقع الأرضي للتصرف حيالها.

• **التسهيلات البحرية:**

توجد في الوقت الحاضر أكثر من ٦٥٠٠ منشأة بحرية لإنتاج الزيت والغاز الطبيعي في حوالي ٥٣ بلداً في العالم، ٤٠٠٠ منها بالولايات المتحدة بخليج المكسيك و٩٥٠ في آسيا و٧٠٠ بالشرق الأوسط و٤٠٠ منشأة في أوروبا.

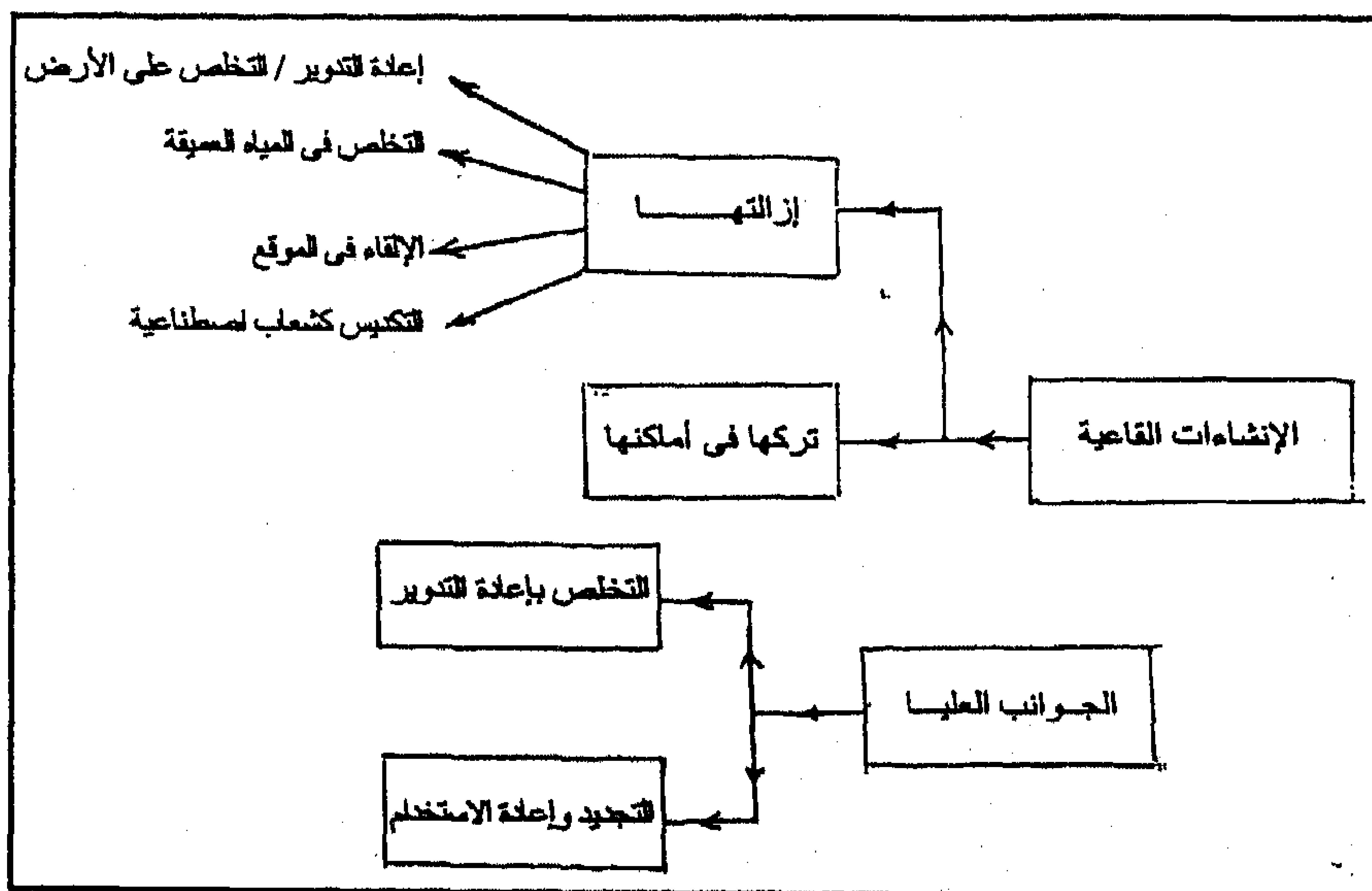
وتتعرض التسهيلات facilities والمنصات البحرية (ثابتة، متنقلة، عائمة وغيرها) إلى خيارات وبدائل مختلفة بخصوص إخلائها حسب نوعها (شكل ٣٠-٤)، ويعتبر حجم البنيان وموقعه من الشاطئ والظروف السائدة للأحوال الجوية وكذا التعقيدات المرتبطة بعملية الإزالة والسلامة من العوامل الرئيسة والمؤثرة على تكاليف الإخلاء، فالمنصات المتنقلة والعائمة يمكن تنكيسها وجرها لاستخدامها في موقع جديد ربما كان غير مكلف وأكثر جاذبية، كما أن المنصات الثابتة يمكن إزالتها ونقلها إلى الشاطئ والتخلص منها، وأما تلك المعتمدة على الجاذبية فبالإمكان من الناحية النظرية تفريغها وتعويمها وإعادتها للخدمة أو التخلص منها بإغراقها في أعماق المحيط، وأما منصات المرفاع فيمكن إزالتها عند عمق مناسب تحت سطح البحر، وأحيانا يتم تنظيفها ووضعها على هيئة شعب اصطناعية artificial reefs على قاع البحر، كذلك فإن التسهيلات تحت البحر من السهل إخلاؤها نظراً لصغر حجمها نسبياً وإمكانية رفعها بسهولة، وبالنسبة للتجهيزات البحرية الملحقة فهي ليست بالصعبة إلا إذا كانت ثقيلة في الوزن حيث قد تزيد على ١٠٠٠ طن مثل بعض المشاعب manifolds ويقتضي الأمر عندئذ الاستعانة ببعض المراكب الرافعة للمساعدة في عملية الإخلاء.

• **التسهيلات الأرضية:**

قبيل البدء في عملية الإخلاء يجري تنظيف تسهيلات المعالجة والإنتاج والمرافق الحيوية بشكل جيد وآمن، ويتم تفكيك ونقل المكونات وفق معايير السلامة والبيئة، وإذا

كانت المنطقة قد تعرضت إلى هبوط أرضي بسبب انضغاط الخزان الجوفي فلا ينصح باستخدام المنطقة لأغراض شاقة قد ينجم عنها آثار بيئية ضارة خاصة إذا كانت من المناطق الساحلية أو الأراضي المنخفضة بطبيعتها.

ونظراً لما لعمليات الإخلاء من أهمية حيوية لا ينبغي غض الطرف عن ذلك وأن ترجأ الإجراءات الخاصة بالإخلاء حتى اللحظة الأخيرة من المشروع، فقد أصبح بصورة متزايدة أن تطالب الشركات العاملة بإعادة مناطق نشاطها إلى حالتها الأصلية كصديقة للبيئة وحيث لا تلوث، وقد تكون الاستفادة منها في نشاط آخر من الأمور الملحة للجهة المالكة.



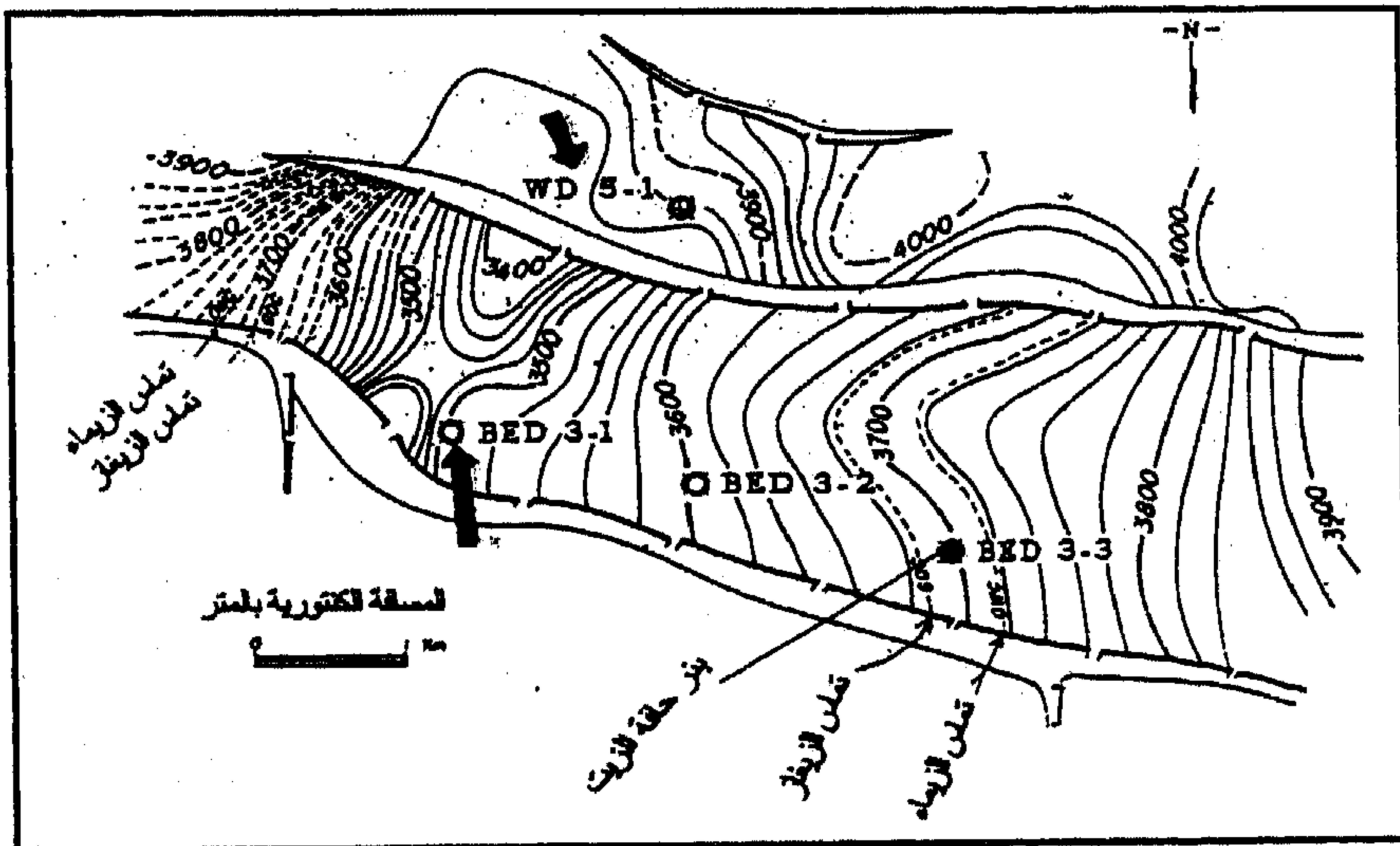
شكل ٣٠-٤: خيارات وبدائل الإخلاء.

وفي الآونة الأخيرة دأب العديد من الشركات العاملة على إجراء مسوحات مرجعية قبل البدء في إقامة منشآتها الإنتاجية لتسجيل الأوضاع البيئية للمنطقة آنذاك لكي يمكن العودة إليها إذا ما اقتضت الضرورة إلى معرفة وتقييم الأثر البيئي جراء عمليات الإنتاج، وربما أمكن بالتالي اتخاذ إجراءات تصحيحية مناسبة.

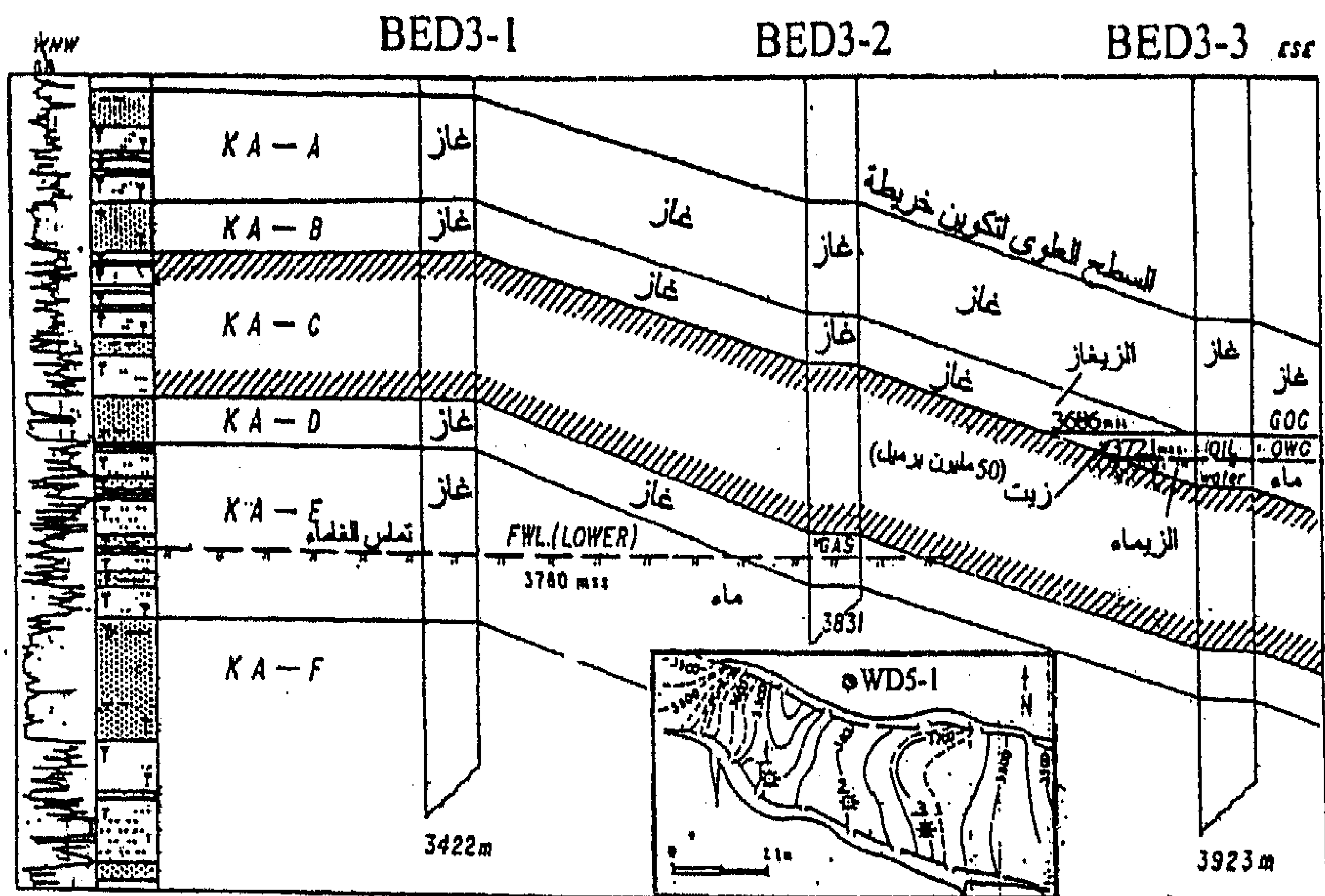
التخلي لا يعني نهاية المطاف:

إن التخلي عن منطقة ما لا يعني أن النشاط البترولي بها قد توقف دون رجعة، فقد يعود هذا النشاط إليها مرة أخرى إذا ما طرحت المنطقة نفسها في مزايدة جديدة وهو ما

أكدته النتائج في عدد غير قليل من الحالات، ولعلنا ندلل على ذلك من خلال مثال في منطقة امتياز بدر الدين Badr El-Din (BED) بالصحراء الغربية في مصر بعد أن تخلت عنها شركة أموكو Amoco الأمريكية وجاءت البئر WD5-1 (شكل ٣٠-٥) التي قامت الشركة بحفرها هناك خاوية باستثناء بعض الشواهد البترولية الضعيفة، غير أن شركة شل Shell العالمية والتي حصلت على امتياز نفس المنطقة في مزايدة لاحقة قد قامت بعدها بإجراء دراسة جيولوجية وجيوفيزيائية متأينة وعلى ضوئها قررت في عام ١٩٨٣ حفر البئر BED3-1 على بعد حوالي كيلومترين من البئر WD5-1 الجافة وكانت المفاجأة أن تم العثور على تجمعين كبيرين للغاز في خزان الحجر الرملي (خريطة) Kharita Sandstone من العصر الكريتاوي السفلي بسمك ٣٠٠ متر ومسامية ١٢-١٣٪ وتشبع مائي ٩٪ وقدر حجم الاحتياطي من الغاز بحوالي تريليون قدم مكعبة وكان ذلك الاحتياطي هو الأكبر بالصحراء الغربية آنذاك، وبالإضافة إلى الغاز فقد تم اكتشاف حافة من الزيت بسمك ٣٥ متراً في البئر BED 3-3 أسفل التجمع العلوي للغاز في نفس الحجر الرملي الذي بلغت مساميته ١٥٪ وتشبعه بالماء ١١٪ وقدر حجم المخزون الأصلي من الزيت بالطبقة كما سبق الإشارة بنحو ٥٠ مليون برميل وهو زيت جيد تبلغ جودته ٣٥ درجة (راجع الشكلين ٣٠-٥ و٣٠-٦).



شكل ٣٠-٥: خريطة تركيبية في تكوين خريطة من الحجر الرملي وتوضح أيضاً موقع بئر WD5-1 بالنسبة للبئر الاستكشافية BED3-1 والبئر BED3-3 التي عثر على طبقة الزيت بها بالصحراء الغربية في مصر.



شكل ٣٠-٦: قطاع جانبي عبر آبار بدر-٣ يوضح تجمعي الغاز (العلوي والسفلي) وحافة الزيت أسفل التجمع العلوي للغاز.

وكانت هذه الطبقة قد تم إدراكها من خلال تفسيرات قياسات الضغط داخل البئرين BED3-2, BED3-1 (شكل ٣٠-٥ و٣٠-٦) باستخدام تقنية RFT والتي سبق شرحها (راجع شكل ١٨-٤٤)، وكانت هاتان البئران قد أشارتا إلى احتمال وجود هذه الحافة البترولية أسفل التجمع العلوي للغاز، وبحفر البئر الثالثة BED 3-3 أسفل الميل تحقق بالفعل وجود الطبقة المعنية وفي ذلك إنجاز يؤكد حرفية التعامل مع البيانات ومنهجية العلم في البحث والتنقيب عن البترول والغاز الطبيعي.

وعلى العموم فعلى المستوى العالمي أوضحت الدراسة الحديثة المنشورة في مجلة أويل أند جاز Oil and Gas Journal أن ثمة تزايداً في الاحتياطي العالمي من الزيت الخام والغاز الطبيعي في أوائل عام ٢٠١١ حيث قدر احتياطي الزيت بحوالي ١٫٥ تريليون برميل بزيادة نسبتها حوالي ٩٪ من عام ٢٠١٠، كما قدر احتياطي الغاز الطبيعي بنحو ٦٫٥٦ كوادريليون (١٠٠٠ تريليون) قدم مكعبة.. وفي ذلك ما يدعونا للتفاؤل بالنسبة لمستقبل البترول والغاز الطبيعي، خاصة وأنه لا تزال هناك مساحات شاسعة على الأرض وفي البحر لم تكشف بعد عن أسرارها، كما أن التكلفة الباهظة في أعمال الاستكشاف

والبحث عن البترول وعلى الأخص بالنسبة لتقنيات المسح السيزمي وكذا حفر الآبار البحرية وما يتبعها من تجهيزات ومعدات لإنتاج الخام تدفع الشركات العاملة إلى التردد مرة بل ومرات قبل اتخاذ القرار المطلوب للشروع في بدء النشاط، ولقد قيل منذ أكثر من نصف قرن إن البترول سوف ينضب خلال عقد أو عقدين من الزمان، ولكن تبقي الحقيقة وهو أننا على موعد مع كشف بترولي جديد يوماً بعد يوم، وأن ثمة مناطق لم يكن لها وجود على الخريطة البترولية أصبحت الآن محاور رئيسة بالنسبة لهذه الصناعة الحيوية.

ومع التوجس المشوب بالحذر لدى البعض من نضوب الموارد البترولية، ولكي يحصل العالم على احتياجاته الماسة من الطاقة، فإن الجهود ينبغي أن تتكرس وتتواصل بشكل جاد حول تطوير وتعظيم المصادر البديلة من الطاقات الجديدة والمتجددة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والمياه والطاقة النووية وغيرها حتى يمكن بالتالي الاحتفاظ بالبترول وتوفيره ليس كمصدر رئيس للطاقة كما هو حادث الآن ولكن كمادة أساسية في الصناعات البتروكيماوية التي تعاظمت استخداماتها في الوقت الحاضر وأصبحت جزءًا لا يتجزأ من احتياجاتنا اليومية الملحة.

ملاحق

- مراجع باللغات الأجنبية
- مراجع باللغة العربية
- فهرس للمصطلحات باللغة الإنجليزية

مراجع باللغات الأجنبية

Selected Bibliography

- Abdel-Aal, H.K., et al.: Petroleum Economics and Engineering, CRC, 2nd ed., 1992.
- Abdel-Aal, Hussein K. et al., (eds.): Petroleum and Gas Field Processing, Marcel Dekker, 2003 – 2007.
- Abdel-Malek, K.A., T. Abd El-Hamid, S. Missidi, Selim Zeidan: Improved hydrocarbon saturation using the phasor induction (PI) in the Badr El Din wells, Western Desert, Egypt, Al-Azhar Engineering Third International Conference, Cairo, December 1993.
- Allen, T.O. and Alan P. Roberts: Production Operations, Vols. 1 & 2, Tulsa, OGCI, 1978.
- Amyx, James W., Daniel, Bass Jr. and Robert L. Whiting: Reservoir Engineering (Physical Properties), McGraw-Hill, 1960.
- Azar, J.J. and G. Robello Samuel: Applied Drilling Engineering, PennWell, 2007.
- Bassiouni, Zaki: Theory, Measurement, and Interpretation of Well Logs, Society of Petroleum Engineers Publications, Richardson, 1994.
- Bayoumi, A.I., Selim Zeidan and Gharib M. Awad: Formation evaluation of El-Nashfa and Bahariya wells using electric logging, Bulletin of Faculty of Science, Cairo University, No. 46, 1973.
- Bradley, H.: Petroleum Engineering Handbook, Society of Petroleum Engineers, 1987.
- Brown, K.: The Technology of Artificial Lift Methods, PennWell, 1977.
- Campbell, John M.: Petroleum Reservoir Property Evaluation, John M. Campbell, Norman, Oklahoma, 1973.
- Chapman, R.E.: Petroleum Geology, Elsevier, Amsterdam, London, 1983.
- Chaudhry, Amanat U.: Oil Well Testing Handbook, Elsevier, Amsterdam, 2003.
- Craft, B.C. and M.F. Hawkins: Applied Petroleum Reservoir Engineering, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliff, N. J., 1959.

- Craft, B.C., W.R., Holden and E.D. Graves, Jr.: Well Design (Drilling and Production), Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1962.
- Dake, L.: Fundamentals of Reservoir Engineering, Elsevier, Amsterdam, London, 1978.
- Dake, L.: The Practice of Reservoir Engineering, Elsevier, Amsterdam, London, 1994.
- Desbrandes, Robert: Encyclopedia of Well Logging, Institut Francais du Pétrole Publications., 1985.
- Desbrandes, Robert: Theorie et interprétation des diagraphies, Technip, Paris, 1968.
- Dickey, Parke A.: Petroleum Development Geology, 3rd ed., PennWell, Tulsa, 1986.
- Dobrin, Milton B.: Introduction to Geophysical Prospecting, 3rd ed., McGraw – Hill Book Company, New York, London, 1976.
- Donaldson, E., G. Chilingrian and T. Fuyen: Enhanced Oil Recovery (Process and Operations), Elsevier, Amsterdam, 1989.
- Economides, Michael J. and Kenneth G. Nolte: Reservoir Stimulation, John Wiley & Sons, 2000.
- El-Kewidy, T., Selim Zeidan and M. Fathi: Integration of reservoir quality and shale zonation indices from conventional petrophysical data to characterize hydraulic units with shaly contents, EGS Journal, Vol. 6, No. 1, March 2008.
- El-Srougy, S. and Selim Zeidan: The use of water analysis data and cased hole logs to identify the aquifer support in North Geisum field. 14th Petroleum Exploration & Production Conference, EGPC, Cairo, October 1998.
- Field Case Histories, Oil and Gas Reservoirs, SPE reprint series, No. 4a, 1975.
- Fox, A.F.: The World of Oil, Pergamon Press, Oxford, London, 1964.
- Fraser, Ken: Managing Drilling Operations, Elsevier, Amsterdam, London, 1991.
- Gatlin, Carl: Drilling and Well Completion, Prentice-Hall, 1960.
- Griffiths, D.H. and R.F. King,: Applied Geophysics For Engineers and Geologists, Pergamon Press, Oxford, New York, 1975.

- Halbouty, M.T. (ed.): Geology of Giant Petroleum Fields, AAPG Memoir, 14, 1970.
- Halbouty, M.T. (ed.): Giant Oil and Gas Fields of the Decade 1968-1979, AAPG Memoir 30, 1980.
- Haun, J.D. and L.W. LeRoy (eds.), Subsurface Geology in Petroleum Exploration, Colorada School of Mines, Golden, 1958.
- Helander, Donald P.: Fundamentals of Formation Evaluation, OGCI Publications, Tulsa, 1983.
- Howard, G.C. and C.R. Fast: Hydraulic Fracturing Monograph, Society of Petroleum Engineers Publications, 1970.
- Hyne, J.J.: Dictionary of Petroleum Exploration, Drilling and Production PennWell Books, Tulsa, 1991.
- Hyne, Norman J.: Petroleum Geology, Exploration, Drilling, and Production, 2nd ed., PennWell Corporation, Tulsa, 2001.
- Jahn Frank., Cook, Mark and Mark Graham: Hydrocarbon Exploration and Production, Elsevier, Amsterdam, London, 2007.
- Joshi, Sada D.: Horizontal Well Technology, PennWell, 1991.
- Karaaly, H., M. El-Daly and Selim Zeidan: The reservoir geology of the Cretaceous sandstone of BED-2 gas/condensate field, Western Desert, Egypt, 13th Petroleum Exploration & Production Conference, EGPC, Cairo, September 1996.
- Katz, D. L. and R. L. Lee: Natural Gas Engineering (Production and Storage), McGraw-Hill, 1990.
- Landsmeer, A.J.: Petroleum Economics, Shell Training Centre, Noordwijkerhout, Holland, 1987.
- Laudon, Robert C.: Principles of Petroleum Development Geology, PTR Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- Levorsen, A.I.: "Geology of Petroleum, 2nd ed., W.H. Freeman and Company, San Francisco & London, 1967.
- Link, Peter K.: Basic Petroleum Geology, OGCI Publications, Tulsa, 1982.
- Lyons, William C. and Plisga, Gray J.: Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering, 2nd ed., Elsevier, Amsterdam, 2005.

- Mayer-Gűrr, Alfred: Petroleum Engineering, Pitman Publishing, London, 1976.
- McCain Jr., D. William: The Properties of Petroleum Fluids, PennWell, 1973.
- Megill, R.E.: An Introduction to Exploration Economics, The Petroleum Publishing Company, Tulsa, 1971.
- Moody, Graham B. (editor): Petroleum Exploration Handbook, McGraw-Hill, 1961.
- Nind, T.E.W.: Principles of Oil Well Production, McGraw-Hill, 1981.
- Nobles, M.A.: Using the Computer To Solve Petroleum Engineering Problems, Gulf Publishing Co., 1974.
- North, F. K.: Petroleum Geology, Allen & Unwin, 1985.
- Pápay, József: Development of Petroleum Reservoirs (Theory and Practice, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2003.
- Pettijohn, F.J.: Sedimentary Rocks, Harper & Row, New York, 1975.
- Pirson, Sylvain J.: Coil Reservoir Engineering, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, London, 1958.
- Rabia, H.: Oil Well Drilling (Principles & Practice), Graham and Trotman, 1985.
- Robello, S.G.: Advanced Drilling Engineering, Gulf Publishing, 2009.
- Royal Dutch / Shell Group: The Petroleum Handbook, 6th ed., Elsevier, Amsterdam, London, 1983.
- Satter, A. and G.C. Thakur: Integrated Reservoir Management-A Team Approach, Elsevier, Amsterdam, London, 1994.
- Schlumberger, Ltd.: Log interpretation Principles, Vol. I, New York, 1974.
- Schlumberger: Cased-Hole Log Interpretation, Houston, 1987.
- Schlumberger: Log Interpretation Principles/Applications, Houston, 1989.
- Schlumberger: Well Evaluation Conference, Egypt, 1984.
- Scholle, Peter A. et al.: Garbonate Depositional Environments, AAPG Memoir 33, 1983.

- Scholle, Peter A. et al.: Sandstone Depositional Environments, AAPG Memoir 31, 1982.
- Seba, Richard D.: Economic of Worldwide Petroleum Production, OGCI and Petroskills Publications, Tulsa, 2003.
- Smith, C.R., G.W. Tracy and R.L. Farrar: Applied Reservoir Engineering OGCI Publications, Tulsa, 1992.
- Smolen, J.J.: Cased Hole and Production Logging Evaluation, PennWell, 1996.
- Stewart, Maurice and Arnold, Ken: Surface Production Operations: Design of Oil Handling Systems and Facilities, Vol. 1 & 2, Butterworth-Heinemann Ltd., 2006.
- Thakur, G.: Water Flooding, SPE Publications, 2003.
- The Egyptian General Petroleum Corporation: Gulf of Suez Oil Fields, EGPC Publications, Cairo, 1996.
- The Egyptian General Petroleum Corporation: Western Desert Oil and Gas Fields, EGPC Publications, Cairo, 1992.
- The International Offshore Oil and Natural Gas Exploration and Production Industry, (Decommissioning Offshore Oil and Gas Installations: Finding the Right Balance), 1996.
- Tomas, Ch.: Process Technology Safety, Health and Environment, Amazon Publishing, 2007.
- Vincent–Genoa, J.: Fundamental of Pipeline Engineering, Gulf Publishing, 1984.
- Zeidan, Selim and F. Soliman: Contribution of geophysical logging methods to cementation in oil wells, 5th Arab Science Congress, Baghdad, March 1966.
- Zeidan, Selim and M. Farghali: Factors affecting the neutron log responses for porosity determination, Ain Shams Science Bulletin, Cairo, November 1971.
- Zeidan, Selim and M. Farghali: Response of electric logs and their quantitative interpretation for saturation evaluation in El-Morgan oilfield UAR, Journal of Geological Society of Egypt, 1970.

- Zeidan, Selim, R. Pearman, S. Missidi and H. Karaaly: The occurrence, detection and economic viability of fractured carbonates in Badr El Din area, Western Desert, 9th Petroleum Exploration & Production Conference, EGPC, Cairo, November 1988.
- Zeidan, Selim, S. Zaki and A. Moneim: BED-1 field Kharita reservoir management, 9th Petroleum Exploration & Production Conference, EGPC, Cairo, November 1988.
- Zeidan, Selim, Y. Zakaria and S. Missidi: The impact of oil base mud on drilling performance and log evaluation in Badr El Din area, Western Desert, 10th Petroleum Exploration & Production Conference, EGPC, Cairo, November, 1990.
- Zeidan, Selim: A study of some unusual behaviour of the self potential log and its interpretation, Bulletin of Faculty of Engineering, Al-Fateh University, Tripoli, Vol. 3, 1977.
- Zeidan, Selim: Analysis of the application of the acoustic logging methods to geological engineering problems in the UAR oilfields, (in Russian). Journal Neftigasov. Geologia i Geofizika, Moscow, No. 8, 1964.
- Zeidan, Selim: Changes of petrophysical properties of oil reservoirs and its reflections in electric logs while developing the fields by water flooding, 5th Arab Petroleum Congress, Cairo, March 1965.
- Zeidan, Selim: Complex of geophysical well logging methods in the UAR, after the example of Bakr oilfield, (in Russian) Isv. Ucheb. Zaved., The Oil and Gas Journal of Baku, No. 8, 1963.
- Zeidan, Selim: Electrical logging proves helpful in water flooding, 6th Arab Petroleum Congress, Baghdad, March, 1967.
- Zeidan, Selim: Evaluation of the residual oil saturation and its effect on porosity determination from resistivity logs, (in Russian), Izv. Ucheb. Zaved. The Oil and Gas Journal of Baku, USSR, No. 2, 1965.
- Zeidan, Selim: Geothermic characteristics of the Tuymazi oilfield (in Russian), Geologia Nefti Gaza, Gostoptekhizdat, Moscow, No. 12, 1963. English translation in "Petroleum Geology", McLean, Va. April 1969.

مراجع باللغة العربية

- البكرى، محمد سمير، سليم زيدان: التعريب ومعجم المصطلحات الهندسية، المؤتمر الهندسى العربى الخامس عشر، طرابلس ١٩٨١.
- البنبى، حمدى: البترول بين النظرية والتطبيق، الطبعة الثانية، دار المعارف، ١٩٩٦.
- البنبى، حمدى: البترول المصرى: تجارب الماضى وآفاق المستقبل، الطبعة الثانية، دار المعارف ١٩٩٩.
- السيد، عبد المقتدر عبد العزيز: البترول وطرق استكشافه، دار الفكر، الأردن، ٢٠٠٨.
- الطحلاوى، محمد رجائى: الخرائط الجيولوجية، دار النشر والتوزيع، جامعة أسيوط ١٩٩٨.
- باكيروف، أ. وآخرون: الأسس النظرية للبحث والتنقيب عن البترول والغاز، ترجمة سمير رياض، دار مير للطباعة والنشر، موسكو، ١٩٧٤.
- دوبرين، ملتون: مقدمة فى الاستكشاف الجيوفيزيائى، ترجمة إسماعيل شعبان إسماعيل وآخرين، دار ماكجروهيل للنشر، ١٩٧٦.
- زيدان، سليم: المسح السيزمى طفرة من الثنائى إلى الرباعى، مجلة البترول، القاهرة، أبريل ١٩٩٧.
- زيدان، سليم: إدارة الخزانات البترولية وتعظيم الإنتاجية، مجلة البترول، القاهرة، يونيه ١٩٩٧.
- زيدان، سليم: كيف نخطط لتنمية العقول، مجلة جيسوم للزيت، القاهرة، سبتمبر ١٩٩٧.
- زيدان، سليم: ديناميكية الاحتياطات البترولية .. لماذا ؟، مجلة البترول، القاهرة، يناير ١٩٩٨.
- زيدان، سليم: تسجيلات الآبار ... ماذا نعرف عنها ؟ مجلة جيسوم للزيت، القاهرة، يوليو ١٩٩٨.

- زيدان، سليم: تقديرات الاحتياطات البترولية، مجلة البترول، القاهرة، مايو/ يونيه ١٩٩٩.
- زيدان، سليم: الطرق الجيوفيزيائية كأداة فعالة فى استكشاف وتنمية الحقول، مجلة البترول، القاهرة، يناير ٢٠٠٦.
- عوض، محمد فتحى: الإنسان والثروات المعدنية، المجلس الوطنى للثقافة والفنون والآداب، الكويت ١٩٨٠.
- ماثويس، وليام: الجيولوجيا الفيزيقية والتاريخية، ترجمة حافظ شمس الدين عبد الوهاب، دار الفكر العربى، ٢٠٠٦.
- معجم المصطلحات العلمية والفنية والهندسية، الطبعة الخامسة، مكتبة لبنان، ١٩٨٠.

A

abandonment	هجر
absorption	امتصاص
accident	حادث، عارض، إصابة
accumulation	تجمع
acidising	معالجة بالحامض
acoustic impedance	المعاوقة الصوتية
acoustic velocity	سرعة صوتية
acquisition	اكتساب، الحصول على
acre-foot	فدان (أكر)- قدم
activity	نشاط
additive	مادة مضافة
adjustable	انضباطي
adsorption	امتزاز
aerial photography	تصوير جوي
aeromagnetic survey	مسح مغناطيسي جوي
age dating	تحديد العمر
air gun	مدفع هواء
alabaster	مرمر
alkaline flooding	إغراق بالقلويات
alkenes	ألكينات
allowance	بدل، سماح، مخصص
alluvial fans	مراوح غرينية
amorphous	عديم التبلور
amplifier	مضخم
amplitude	سعة
anaerobic	لاهوائي
angular unconformity	لاتوافق زاوي
anhydrite	آنهيدريت
anisotropy	تباين الخواص
annulus	حيز حلقي (فراغ)
anomaly	شذوذ، مغايرة
anticlinal theory	نظرية الطية المحدبة
anticline	طية محدبة
API	معهد البترول الأمريكي
appraisal well	بئر تقييمية
aquifer	خزان ماء جوفي
artificial lift	رفع اصطناعي
associated gas	غاز مرافق
asthenosphere	الأسينوسفير
asymmetrical structure	تركيب غير متماثل
atmosphere	الغلاف الجوي
atoll	أتول (جزيرة مرجانية حلقية)
atomic decay	انحلال ذري
attenuation	توهين، وهن
audits	أعمال التدقيق والمراجعة
authority	سلطة
automatic control	تحكم أوتوماتيكي
availability	وفرة، تواجد
awareness	وعي
axial plane	مستوى محوري
axis	محور
azimuth orientation	توجه سمتي

B

backflush	تنظيف معاكس
back-pressure	ضغط معاكس
bacteria	بكتيريا
baffle	حاجز، عارضة

bailer	منزحة
barefoot completion	إكمال عار (حاف)
barge	نقالة مائية، صندل
barge, drilling	مركب الحفر
barrel	برميل
barren trap	مصيدة خاوية
barrier reef	شِعْب حاجزي، حاجز مرجاني
basal	قاعدي، أساسي
basalt	بازلت
base case	حالة قاعدية
base map	خريطة أساس
baseline	خط القاعدة
basement rock	صخر القاع
basic sediment& water	الرواسب الأساسية والماء
basin	حوض
beach sandstone	حجر رملي شاطئي
beam pump	مضخة ذراعية
bed	طبقة
bedding plane	مستوى الطباقية
benchmark	استرشادي، مرجعي
bent sub	قطعة محنيّة
bentonite	بنتونيت
benzene	بنزين
best guess	أفضل تخمين
biogenic gas	غاز بيوجيني (حيوي)
bioherm	بيوهيرم
biotite	بيوتيت (الميكا السوداء)
bit	مثقب، دقاق
block	كتلة، قالب
block diagram	رسم تخطيطي
block oil	الزيت الأسود (مازوت)
blow out preventer (BOP)	مانع التفجر
blowout	تفجر، ثوران، تدفق
boiling point	نقطة الغليان
bonus	حافز
borehole	بئر، ثقب
bottomhole assembly	مجموعة قعر البئر
bottomhole completion	إكمال قاعي
bottomhole pressure	الضغط القاعي
bouguer correction	تصحيح بوجير
boulder	جلمود
braided	مضفر
breakthrough	اقتحام، اختراق
breccia	بريشيا
bridge	قنطرة
bright spot	بقعة ناصعة
brine	ماء ملح أجاج
british thermal unit	وحدة حرارية بريطانية
bubble pressure	ضغط الفقاعة (ضغط التشبع)
build angle	زاوية البناء (النهوض)
buildup test	اختبار البناء
bullet	قذيفة، طلقة
butane	بوتان
button	زر
bypassing	تجاوز، تخطي

C

cable	كبل
cable tool rig	حفارة كبلية
calcite	كالسيت
caliper log	سجل قطر البئر

calorific value	القيمة الحرارية	chalk	طباشير
Cambrian period	العصر الكمبري	checkshot survey	مسح طلقة التأكد
capacity	سعة، قدرة، أهلية	chemical flood	الإغراق بالكيماويات
capex	المصروفات التشغيلية	chert	تشيرت، صُوان
capillary pressure	ضغط شعري	choke (well)	خانق
caprock	صخر الغطاء	choke manifold	مشعب خانق
carbon dioxide	ثاني أكسيد الكربون	christmas tree	شجرة عيد الميلاد
carbonate rock	صخر كربوناتي	circulating system	نظام دورة سائل الحفر
carbonation	كربنة	clastic rock	صخر فتاتي
Carboniferous period	العصر الكربوني	clay	صلصال، طين
carrier bed	طبقة حاملة	clean oil	زيت نظيف
cased hole	بئر مغلفة	clean sand	رمل نظيف
cased hole completion	إكمال مغلف	cleavage	تشقق، تفلج
cased-hole log	سجل بئر مغلفة	cliff	جرف صخري
cash flow	تدفق نقدي	closure	إغلاق، انغلاق، إقفال
casing	قيسون (أنبوب تغليف)	cloud point	نقطة التغيم
casing string	أنبوب التغليف	clusters	مجموعات
catalyst	حافز (عامل حفّاز)	coal	فحم
cathodic protection	حماية مهبطية	coarsening	تخشن
caustic flooding	الإغراق بالمواد الكاوية	coastal plain	سهل ساحلي
cement	أسمنت، ملاط	cobble	حصباء
cement bond log	سجل ترابط الأسمنت	coiled tubing	أنبوب ملفوف
cement plug	سدادة أسمنتية	collapse	انهيار
cement slurry	ملاط الأسمنت	collar (pipe)	طوق، جلبة
cement squeeze job	سمنتة تحت الضغط	colour display	إظهار ملون
cementation (rock)	سمنتة	column	عمود
cementing (well)	التثبيت بالأسمنت	combination	تآلف، توافق، توحد، ضم
Cenozoic era	عصر الحياة الحديثة	commingled production	إنتاج مشترك
centralizer	ممركز	commissioning	تشغيل
centrifuge	نابذة بالطرد المركزي	communication	اتصالات

compact	مدموج	contour lines	خطوط الكنتور
compaction	دموج بالانضغاط	contouring	كنترة
company man	ممثل الشركة	contract	عقد، تعاقد
compartment (segment)	قسم	control	ضبط، تحكم
compensated log	سجل مُعَادل	convolution	لف، لوي، احتواء
completion fluid	مائع الإكمال	core	لب
completion packer	حشوة الإكمال	core barrel	ماسورة العينات اللبية
compliant tower	برج مستجيب أو مطاوع	coring	أخذ العينات اللبية
composite sample	عينة مركبة	correction	تصحيح
composition	تركيب	correlation	مضاهاة
compressibility factor	عامل الانضغاطية	corrosion	تآكل
compression	انضغاط ، ضغط	corrosion inhibitor	مانع للتآكل
compressors	ضواغط	corrosive gas	غاز آكال
computer	كمبيوتر (حاسوب)	cost oil	زيت التكلفة
concession agreement	اتفاقية التزام	crane	مرفاع (ونش)
condensate	متكثفات	crest	قمة
conductivity log	سجل الموصلية	Cretaceous period	العصر الطباشيري
conductor pipe	الأنبوب الدليلي	crew	طاقم، طقم، فريق
conformable	متوافق	crew	طاقم، طقم، مجموعة
conglomerates	كونجلومرات	critical point	النقطة الحرجة
coning	تمخرط، تكوّز	crooked hole	ثقب (بئر) منعطف
connate water	ماء حبيس	cross bedding	طباقية متقاطعة
consolidated rock	صخر متماسك (متصلب)	cross flow	انسياب مستعرض
contact	تماس	crossbed	طبقة متقاطعة
contaminant	مادة ملوثة	crossover	مفرق
continental crust	القشرة القارية	crown block	مجموعة البكرات العلوية (الثابتة)
continental drift	الانجراف القاري	crude oil	زيت خام
continental shelf	رصيف قاري	crust	القشرة
contour interval	مسافة كنتورية	crystal	بلورة
contour line	خط كنتور	cumulative production	إنتاج تراكمي

cuttings	فتات، حُفارة
cuttings	حُفارة (فَتات)
cycling	تدوير

D

damage	ضرر، أذى
darcy	دارسي
data	بيانات، معطيات
data acquisition	اكتساب البيانات
datum	منسوب
daughter atom	الذرة الوليدة
decline curve	منحنى الهبوط
decommissioning	تخلي، إزالة
deconvolution	فك الاحتواء
deep water	ماء عميق
deformation	تشوه
dehydration	نزع الماء، تجفيف
delineation well	بئر تحديدية
deliverability	القابلية للتصريف
delta	دلتا
demulistier	مفكك للمستحلب
density log	سجل الكثافة
depletion	نضوب
depletion drive	دفع النضوب
depositional	ترسيبي
depth	عمق
derrick	برج الحفر
demulsifier	مفكك المستحلب
desander	مزيل الرمل
developed reserves	احتياطيات منماة
development geologist	جيولوجي تنمية
development well	بئر إنمائية
developmental drilling	حفر إنمائي
deviated well	بئر مائلة (حائدة)
deviation	انحراف، حيدان
dew point	نقطة الندى
diagenesis	العمليات اللاحقة
diamond	ألماس
diamond bit	مثقب ألماسي
diesel engine	محرك ديزل
digitizing	ترقيم
dim spot	بقعة العتم
dip	ميل
dip log	سجل الميل
dipmeter	مقياس الميل
dip-slip fault	صدع الميل
directional drilling	حفر اتجاهي
directional survey	مسح اتجاهي
dirty sand	رمل وسخ
disconformity	لاتوافق تخالفي
discontinuity	انقطاع
discount rate	معدل الخصم
displacement efficiency	كفاءة الإزاحة
disposal	تخلص من، تنظيم، تصرف
dissolution	إذابة
distributaries	فروع
distributary channel	مجرى فرعي
dog legs	سيقان معطوفة
dolomite	دولوميت
dolomitisation	دلمتة
dome	قبة

drag fold	طية انزلاقية
drainage	تصريف
draw works	الأجهزة الرافعة
drill collar	طوق الحفر
drill pipe	أنبوب أو ماسورة الحفر
drill ship	سفينة الحفر
drill stem test	اختبار ساق الحفر
driller	حفار
drilling operation	عملية الحفر
drilling superintendent	رئيس الحفر (مشرف عام الحفر)
drive mechanism	آلية الدفع
drop angle	زاوية سقوط
dry gas	غاز جاف
dry hole	بئر جافة (خاوية)
dual completion	إكمال ثنائي
dual laterolog	لاتيرولوج ثنائي
dump bailer	مرفاع إفراغ
dune sandstone	رمل كثيبي
dynamite	ديناميت

E

E&P (exploration & production)	الاستكشاف والإنتاج
earth age	عمر الأرض
earth crust	القشرة الأرضية
earth interior	باطن الأرض
earth structure	بنية الأرض
earthquake	زلزال
economic indicator	الدليل الاقتصادي
economic life	العمر الاقتصادي
economic limit	الحد الاقتصادي
eddy current	تيار دوامي
effective permeability	نفاذية فعالة
effective porosity	مسامية فعالة
efficiency	كفاءة، فاعلية
EIA (environmental impact assessment)	تقييم الأثر البيئي
electric current	تيار كهربائي
electric log	سجل كهربائي
electric submersible pump	مضخة غاطسة كهربائية
electromagnetic	كهرومغناطيسي
elevation	ارتفاع
embrittlement	تقصف
emergency	طوارئ، اضطراري
emulsion	مستحلب
enhanced oil recovery	الاستخلاص المعزز للزيت
environment	بيئة
epirogenic movement	حركة بناء القارات
epoch	حين، حقبة، عصر، زمن
era	دهر، حقبة
eroded	معرى، متآكل
erosion	تعرية، تحات
erosional features	معالم تعرية
eternal fires	النيران الأزلية
ethane	إيثان
evacuation	إجلاء، إفراغ
evaluation	نشوء، تطور
evaporites	متبخرات

expansion	تمدد
expectation curves	منحيات التوقع
expected monetary value	القيمة النقدية المتوقعة
exploitation	استغلال
exploration	استكشاف
exploration geologist	جيولوجي الاستكشاف
exploration phase	مرحلة الاستكشاف
exploratory drilling	حفر استكشافي
exploratory well	بئر استكشافية
explosive	متفجر، مادة متفجرة
extended reach well	بئر ممتدة
external constraints	القيودات الخارجية
extinct species	نوع منقرض

F

facies	سحنة
facies change	تغير سحني
facilities	تسهيلات
false value	قيمة زائفة
fatality	إصابة قاتلة
fault	صدع، فالق
faulting	تصدع
feasibility study	دراسة جدوى
fence diagram	مخطط سياجي
field	حقل
field superintendent	مدير الحقول
filter	مرشح
filtrate	راشح
fireflood	الإغراق بالحريق
fish/junk	سقط ، نفاية
fishing (well)	اصطياد، التقاط
fishing tool	آلة الاصطياد
fixed platform	منصة ثابتة
fixed pump	مضخة ثابتة
flaring	توهيج، اشتعال
flat spot	بقعة مسطحة
flint	صَوان
float	عوامة
float collar	طوق عائم
floating production, storage and offloading vessel	مركب الإنتاج وتخزين وتفريغ البترول
flow rate	معدل التدفق
flow units	وحدات التدفق
flow value	صمام التدفق
flowing pressure	ضغط التدفق
flowline	خط التدفق
fluid	مائع
fluid pressure	ضغط الموائع
fluorescence	فلورسنت
flushed zone	النطاق المكسوح
foam drilling	الحفر بالرغوة
focused log	سجل موجه
fold	طية، ثنية
foliated	صفحي
footwall	الجدار السفلي
formation damage	ضرر التكوين
formation density log	سجل الكثافة
formation factor	عامل التكوين

formation multitester	المختبر المتعدد الغرض
formation pressure	ضغط التكوين
formation volume factor	المعامل الحجمي للتكوين
fossil	حفرية
frac job	عملية تكسير
fracture	شق ، شرخ
fractured rock	صخر مشقق
free gas cap	غطاء الغاز الطليق
free water	الماء الحر
free water level	مستوى الماء الحر
fresh water	ماء عذب
front	جبهة
frost	صقيع

G

galena	جالينا
gamma ray	أشعة جاما
gas	غاز
gas cap	غطاء غاز
gas processing	معالجة الغاز
gas-oil contact	تماس الغاز والزيت (الزيغاز)
gas-oil ratio	نسبة الغاز للزيت
gasoline	جازولين، بنزين
gas-water contact	تماس الغاز والماء (الغاماء)
gathering station	محطة تجميع
gauge	مقياس
geiger counter	عداد جايجر
generation	تولد، تكون
generator	مولد، دينامو
geochemical exploration	استكشاف جيوكيميائي
geochemistry	جيوكيمياء
geologic map	خريطة جيولوجية
geologic symbol	رمز جيولوجي
geologic time	الزمن الجيولوجي
geological engineer	مهندس جيولوجي
geological model	النموذج الجيولوجي
geology	علم الأرض، الجيولوجيا
geophones	جيوفونات (سماعات أرضية)
geophysicist	جيوفيزيائي، جيوفيزيقي
geostatic pressure	الضغط الأرضي الكامن
geosteering	التوجيه الجيولوجي
geothermal gradient	تدرج جيوحراري
giant oil field	حقل زيت عملاق
GIIP	المخزون الأصلي من الغاز الطبيعي
glaciers	مثالج
glycol	جلايكول
gneiss	نيس (صخر متحول)
graben	أخدود، صدع خسيف
gradiometer	مقياس التدرج
gradient	تدرج
grain density	كثافة الحبة
grain size	حجم الحبة
granite	غسول الجرانيت
granite	جرانيت
granule	حبيبة
graphite	جرافيت
gravity	الجاذبية
gravity anomaly	شاذة جاذبية
gravity drainage	التصريف بالجاذبية

gravity exploration	استكشاف بالجاذبية
gravity meter	مقياس الجاذبية
grid blocks	القوالب الشبكية
gross	كلي، إجمالي
ground level	سطح الأرض
ground water	ماء أرضي
growth fault	صدع نمو
guard log	سجل التوقي أو التحرز
guide fossil	حفرية مرشدة
gyspsum	جبس

H

half-life	نصف العمر
halite	هاليت، ملح الطعام
hanger	معلاق، حمالة
hanging wall	الجدار المعلق
hardness	صلابة، صلادة
haydrate	هيدرات
hazard	خطر، خطورة
header	رأس ، مقدمة
heating value	القيمة التسخينية
heave	فسحة، انزياح صدعي
hectare	هكتار
high pressure	ضغط مرتفع
history match	مواءمة أو مطابقة تاريخية
hoisting system	نظام الرفع
homocline	طية متجانسة الميل
homogeneous	متجانس
horner plot	مخطط هورنر
horst	نتق، مستهضب
host government	الحكومة المضيفة
hulf and puff	هبّة ونفخة
hydraulic fracturing	تكسير هيدروليكي
hydraulic pump	مضخة هيدروليكية
hydrofluoric acid	حامض هيدروفلوريك
hydrogen sulphide	كبريتيد الهيدروجين
hydrophone	هيدروفون (سماعة مائية)
hydrosphere	الغلاف المائي
hydrostatic pressure	ضغط هيدروستاتيكي

I

ice age	العصر الجليدي
igneous rock	صخر ناري
imaging log	السجل المصور
immature oil	زيت غير ناضج (فج)
imperial gallon	جالون امبراطوري
impermeable	غير منفذ
improved oil recovery	الاستخلاص المحسن للزيت
incident	حادث
index fossil	حفرية دالة
indigenous	أصيل
induction log	سجل الإحاثة
inert gas	غاز خامل
infill well	بئر بينية
infinite reservoir	خزان غير محدود
inhibitor	مانع
initial pressure	الضغط الابتدائي (الأولي)
initial production	الانتاج الابتدائي (الأولي)
injection well	بئر حقن

inner core	اللب الداخلي للأرض
in-situ combustion	الاحتراق بالموقع
intangible cost	تكلفة غير ملموسة
intelligent well	بئر ذكية
interest	فائدة
interfacial tension	التوتر السطحي
intermediate casing	قيسون متوسط
intermittent	متقطع
interpretation	تفسير، تأويل
interval transit time	زمن العبور البيني
intrusion	تدخل، تداخل
invaded zone	النطاق المغزو
investment	استثمار
irreducible water	ماء لا ينتقص
irregular shapes	أشكال غير منتظمة
isochrone map	خريطة تساوي الزمن
isolith map	خريطة تساوي الليثولوجية
isomeric projection	إسقاط إيزومتري
isopach map	خريطة تساوي السمك
isotrapic	متساوي الخصائص

J

jack up rig	جهاز الحفر المرفاع
jacket	دسار، غلاف، قميص
jet bit	مثقب ذو منفث
jet drilling	الحفر بالنفاث
joint (pipe)	وصلة، توصيلة، ماسورة
joint (rock)	فاصل، شق، فلق
jointing	تمفصل
jug hustler	عامل الجيوفونات
junk	سقطة، نفاية، خردة
junked well	بئر مهجورة
Jurassic period	العصر الجوارسي
juxtaposition	مقاربة، تجاور

K

karst limestone	حجر جيري كارستي
kelly bushing	عمود الحفر المضلع
kerogen	كيروجين
kerosoene	كيروسين (جاز)
key horizon	نطاق رئيس
kick	رفسة، ركلة
kill fluid	مائع لقتل البئر
killing (well)	قتل البئر
kitchen	مطبخ

L

landing barge	صندل الانزال
landslides	انزلاقات أرضية
laterolog	اللاتيرولوج (موجه)
leading edge	الحافة المتقدمة
lease	عقد تنمية
legislations	تشريعات
lenticular	عدسي
liability	مسئولية قانونية
liaison	ارتباط
lignite	لجنيت
limestone	حجر جيري
liner string	قميص أسطواني
liquefied natural gas	الغاز الطبيعي المسال

liquefied petroleum gas	غاز البترول المسال
lithologic log	سجل الليثولوجية
lithology	ليثولوجية
lithosphere	الغلاف الصخري
log	سجل
log response	استجابة السجلات
log time	وقت التخلف أو التأخر
logging	عملية التسجيل
logging while drilling	التسجيل أثناء الحفر
logistics	لوجيستيات (فن النقل والامداد)
long-spaced devices	أجهزة التباعدات الطويلة
lost circulation	الدورة المفقودة
lost section	القطاع المفقود
lubricant	مزلق
lustre	بريق

M

magnetic anomaly	شاذة مغناطيسية
magnetic exploration	استكشاف مغناطيسي
maintenance	صيانة
major oil company	شركة بترول كبرى
management	إدارة
mantle	الوشاح
mapping	تخريط ، رسم الخرائط
marker bed	طبقة محددة
marketing	تسويق
marsh gas	غاز المستنقعات
mast	صار، سارية
master value	صمام رئيس
material balance	اتزان المادة
material eor	الاستخلاص الميكروبي
matrix	مادة هيكل الصخر
mature area	منطقة (تامة النمو)
mature oil	زيت ناضج
maturity	نضج
maximum cash exposure	التعرض الأقصى للنقود
mean sea level	متوسط سطح البحر
meander	منعطف ، تعرج
measured depth	العمق المقاس
measurement sensors	محاسيس القياس
measurement while drilling	القياسات أثناء الحفر
Mesozoic era	الدهر الوسط (حقب الحياة الوسطي)
metamorphic rock	صخر متحول
meteoric water	ماء سماوي
methane	ميثان
mica	ميكا، بلق
microfossil	حفرية دقيقة
microlog	سجل الميكرولوج الدقيق
microresistivity log	سجل المقاومة الدقيق
mid-ocean ridge	حيد وسط المحيط
migration	هجرة، إرتحال
mineral property	خاصية المعدن
miscible fluid	مائع قابل للاختلاط
missing section	المقطع المفقود
mobilisation	تعبئة، تجهيز، تحريك
mobility	نسبة التحركية
model	نموذج
modular dynamic tester	المختبر الديناميكي

mohs scale مقياس موه
moisture index دليل الرطوبة
monitoring مراقبة الإرسال
mooring anchor مرساة إرساء
mooring buoy طافية إرساء
mooring mast صاري الربط
moraine ركام مثلجي
mud cake قشرة أو كعكة الطين
mud engineer مهندس الطفل
mud filtrate راشح الطين
mud log سجل الطين
mud pulse telemetry
القياس عن بعد بواسطة سائل الحفر
mud pump مضخة الطين
mud tank صهريج الطين
mudflows انسيابات طينية
multi-lateral wells آبار متعددة الجوانب
multiple completion إكمال متعدد
multirate test اختبار متعدد المعدلات
multi-stage completion إكمال متعدد المراحل
muscovite مسكوفيت (الميكا البيضاء)

N

naphthenes نفثين
natural gas غاز طبيعي
natural gas processing plant
مصنع معالجة الغاز
natural gas reserve احتياطي الغاز الطبيعي
net pay سمك الخزان المغل
net present value القيمة الحالية الصافية للنقود
net/gross ratio
نسبة السمك الصافي إلى السمك الكلي
neutron log سجل النيوترون
noise ضوضاء، شوشرة، تشويش
nonassociated gas غاز غير مصاحب
non-retrievable packer حشوة لا تستعاد
normal dip-slipfault صدع ميل عادي
nozzle فوهة، بزباز، صنبور
nuclear magnetic resonance log
سجل الرنين المغناطيسي النووي

O

oblique-slip fault صدع مائل
ocean environment بيئة المحيط
ocean sediments رواسب المحيط
ocean topography طبوغرافية المحيط
oceanic crust القشرة المحيطية
off structure well
بئر خارج التركيب الجيولوجي
offset distance مسافة مقابلة
offset well بئر مقابلة أو مجاورة
offshore completion إكمال بحري
offshore drilling حفر بحري
offshore survey مسح بحري
offshore well intervention تدخل بئري بحري
offtake rate معدل السحب
oil field brine الماء المصاحب لحقول البترول
oil in place مخزون الزيت
oil refining تكرير الزيت
oil seep مرشح، نشع زيتي، نز زيتي

oil shale	طفل زيتي - طفل الزيت
oil-based mud	طفل على أساس زيتي
oil-water contact	تماس الزيت والماء (الزيماء)
oil-wet rock	صخر محب للبلل بالزيت
oleum	زيت
on structure well	بئر على التركيب الجيولوجي
oolitic limestone	حجر جيري بطروخي
open-hole log	سجل البئر غير المغلفة
operator	مشغِّل
opex	المصروفات التشغيلية
Ordovician period	العصر الأوردوفيشي
organic compounds	مركبات عضوية
orifice	فوهة، فتحة
original pressure	الضغط الأصلي
orogenic movement	حركة نشوء الجبال
outer core	اللب الخارجي للأرض
overthrust belt	حزام راكب
overtreatment	معالجة مفرطة
overbalance	اتزان زائد
overpressure	ضغط زائد
oxbow lake	بحيرة قوسية
oxidation	أكسدة، تأكسد

P

P/Z plot	مخطط p/z
packer	حشوة
pad	وسادة
palaentological data	معطيات بليتولوجية
paleozoic era	دهر الحياة القديمة
pangaea	بانجيا (القارة العملاقة القديمة)
paraffin scraper	كاشط البرافين
parent atom	الذرة الأم (التتوج)
payout time	وقت أول استرداد
pebble	حصاة، حصبة
percentage map	خريطة النسبة
perforated casing liner	قيسون مثقب
perforating gun	مدفع تثقيب
permeability	نفاذية
permeameter	مقياس النفاذية
personal computers	الحسابات الشخصية
pentane	بنتان
petra	صخر
petroleum	بترول
petroleum economics	اقتصاديات البترول
petroleum engineer	مهندس بترول
petroleum geologist	جيولوجي بترول
petroleum trap	مصيدة بترولية
petrophysicist	بتروفيزيائي
petrophysics	علم البتروفيزياء
pinch out	ترقق، تضاؤل
pinnacle reef	الشعاب القممية
pipeline	خط الأنابيب
planet	كوكب
planimeter	بلانيمتر (مقياس المسطحات)
planning and control	التخطيط والمراقبة
plasticity	تلدنية
plate tectonics	تكتونية الألواح
plateau period	فترة الهضبة الإنتاجية
platforms	منصات، أرصفة
Pleistocene epoch	حقبة البليوستوسين
Pliocene period	عصر البليوسين

plug and abandon سد وهجر
polymers بوليميرات
pool بركة بترولية
pore spaces الفراغات المسامية
porphyrin بورفيرين
possible reserves احتياطيات محتملة
pounds per gallon رطل بالجالون
predevelopment ما قبل التنمية
present value القيمة الحالية
primary migration الهجرة الأولية
primary stratigrophic traps
المصايد الطبقية الأولية
prime movers محركات أساسية
probable reserves احتياطيات مرجحة
probalility of success احتمالات النجاح
process عملية
processing إعداد، معالجة متعاقبة
procurement مشتريات، تموين
production إنتاج
production log سجل الإنتاج
production platform منصة إنتاج
production sharing contracts
عقود اقتسام الإنتاج
productivity إنتاجية
profit ربح، مكسب
profit oil زيت الربح
profitability أدلة الربحية
project مشروع
projections إسقاطات

proved (proven) reserves
احتياطيات مؤكدة
pulsed neutron log
سجل النيوترون النبضي
PVT analysis
تحليل الضغط والحجم والحرارة
pyrite بيريت (معدن)

Q

quantitative analysis تحليل كمي
quartz مرو، كوارتز
quaternary period الدهر الرابع
quick-look log سجل النظرة السريعة

R

radioactive مشع
radioactivity الإشعاعية
rat hole ثقب الفأر
rate of penetration معدل الاختراق
rate of return معدل العائد
recompletion إعادة الإكمال
recording truck عربة التسجيل
records سجلات
recoverable reserves
احتياطيات قابلة للاستخلاص
recovery استخلاص، استعادة، استرداد
recovery factor عامل الاسترجاع (الاسترداد)
recrysallisation اعادة التبلور
recumbent anticline طية مضطجعة
reef شِعْب
reef facies سحنة الشعاب

refining	تكرير
reflection	إنعكاس
refraction	انكسار
regulation	تنظيم، ضبط، قانون
relative age	العمر النسبي
relative permeability	نفاذية نسبية
reliability of data	وثوقية البيانات
relief well	بئر تخفيف (تنفيس)
remote control	تحكم من بعد
remote sensing	استشعار من بعد
repair	إصلاح
repeat formation tester	المختبر المتكرر للتكوين
repeated section	قطاع مكرر
reserve estimates	تقديرات الاحتياطي
reserve pit	حفرة احتياطية
reserve tank	صهريج احتياطي
reserves	احتياطيات
reservoir characterization	تميز الخزانات
reservoir engineer	مهندس الخزانات
reservoir modeling	نمذجة الخزان
reservoir performance	أداء الخزان
reservoir simulation	محاكاة الخزان
residual oil	زيت متبقي
resistivity log	سجل المقاومة
resistivity, electrical	مقاومة كهربائية
resource	مورد، مصدر
retrievable packer	حشوة قابلة للاستعادة
retroactive	رجعي
retrograde condensate	متكثفات رجعية
revenue	عائد، دخل
reverse	معكوس
ridge	حيد
rift	خسف، شق، أخدود
rig down	تنزيل جهاز الحفر
risk	مخاطرة
river sandstone	رمال الأنهار
rock cutting	فتات الصخر
rock deformation	تشوه الصخر
rock identification	تعيين الصخر
rock matrix	مادة الصخر (الهيكل)
rock texture	نسيج الصخر
rod pumping system	نظام الضخ بالقضبان
rollover anticline	طية متدحرجة
rotary rig	جهاز حفر دوار
rotary table	الطاولة الدوارة
roughneck helper	مساعد حفار
roustabout	عامل على جهاز الحفر
royalty	إتاوة
run (trip)	رحلة، شوط، سير

S

safety	أمن، سلامة
Safety relief valve	صمام أمان تنفيسي
sales-quality gas	جودة الغاز المبيع
salinity	ملوحة
salt	ملح
salt dome	قبة ملح
sample	عينة
sample examination	فحص العينات

sampling bomb
أسطوانة لجمع عينات السوائل
sand رمل
sand cleanout تنظيف الرمل
sand consolidation تماسك الرمل
sand control التحكم في الرمل
sand dune كثيب رملي
sandstone حجر رملي
satellite development تنمية مساعدة (تابعة)
satellite photography
التصوير بالأقمار الاصطناعية
satellite well بئر تابعة (قاصية)
saturated مشبع
saturated pool بركة مشبعة
saturation تشبع، إشباع
scale مقياس، ميزان، قشرة
scale inhibitor مانع لتكون القشور
scales ميزان، قشور، حراشيف
scheduling تنظيم قائمة المواعيد
scintillation ومضان، وميض
screening value القيمة المنخلية (الغربلية)
sea level مستوى سطح البحر
sea water ماء البحر
seal لاحم، خاتم، مانع للتسرب
sealing fault صدع مانع للتسرب
seamless غير ملحوم
secondary gas cap غطاء غازي ثانوي
sediment layer طبقة مترسبة
sedimentary rock صخر رسوبي
sedimentary structure تركيب رسوبي

seismic data بيانات سيزمية
seismic data acquisition
اكتساب البيانات السيزمية
seismic data interpretation
تفسير البيانات السيزمية
seismic data processing
معالجة البيانات السيزمية
seismic exploration استكشاف سيزمي
seismic horizon نطاق (أفق) سيزمي
seismic record سجل سيزمي
seismic section قطاع سيزمي
seismic survey مسح سيزمي
self potential جهد ذاتي (تلقائي)
semilog نصف لوغاريتمي
semisubinersible platform منصة شبه غاطسة
sensitivity analysis تحليل الحساسية
sensor محساس (حساس)
separation فصل
separator فاصل
sequestering agent منحي أيونات
service company شركة خدمات
service contract عقد خدمات
setting /hardening تصلب، شك (الأسمنت)
severity شدة
shaker tank صهريج اهتزازي
shale طفل، طين صفحي
shale oil الزيت الحجري (القيري)
shale shaker رجّاجة (هزازة) الطفل
shallow resistivity مقاومة ضحلة
shallow water ماء ضحل

shear wave موجة القص، موجة مستعرضة
shearing stress إجهاد القص
shield درع
shoreline sandstone رمل شاطيء
short normal resistivity مقاومة المسبار القصير
short radius well بئر قصيرة القطر
shrinkage انكماش
sidewall coring أخذ العينات الجانبية
site preparation تجهيز الموقع
skin effects التأثيرات الجلدية (السطحية)
slope ميل، انحدار
slotted liner ماسورة مشقوقة
sloughing shale طفل منسلخ
slug catcher صائد السلج
smearing مادة دبقة
solution gas-oil ratio نسبة الغاز المذاب إلى الزيت
solution-gas drive دفع الغاز المذاب
sonic log سجل صوتي
sorting فرز
sour crude خام حذيق (حامضي)
source rock صخر المصدر (المنشأ)
specific gravity الوزن النوعي
spectral gamma ray log سجل جاما الطيفي
spill point نقطة التصريف
spontaneous potential log سجل الجهد التلقائي
spotting fluid مائع التبقيع
spread انتشار
spring زنبرك
spud data تاريخ البدء
spudding / spudding in بدء الحفر
squeeze cementing السمنتة بالكبس
s-shaped curve منحنى حرف إس
stabilizer موازن، مقر
stacking reflection انعكاس تكديسي
stand (pipe) حامل، ماسورة
standard conditions الظروف القياسية
steal tooth سنة فولاذية (من الصلب)
steam flood الإغراق بالبخار
steam injection الحقن بالبخار
stepout well بئر درجية (خطوية)
stick plot مخطط العصي
stimulation تنشيط، تحفيز
stock tank صهريج تخزين
storage تخزين، خزن، إختزان
straddle منفرج، ذو جانبين
straight hole بئر عمودية (مستقيمة)
stratification تطبق، تكون الطبقات
stratigraphic trap مصيدة طبقية
stratigraphy علم الطبقات
streak مكسر
streamer شريط، راية، كم الريح
strike line خط المضرب
strike-slip fault صدع مضربي
stripper well بئر حدية الإنتاج
structural contour خريطة تركيبية كنتورية
structural cross section مقطع تركيبي جانبي

structural map	خريطة تركيبية
structural trap	مصيدة تركيبية
structure	تركيب، بنية، بنيان
stuck pipe	أنبوب عالق (ملتصق)
subsea	تحت سطح البحر
subsea completion	إكمال تحت بحري
subsidence	هبوط، انخساف
substructure	إنشاء قاعدي (تحت سطحي)
subsurface conditions	ظروف تحتسطحية
subsurface map	خريطة تحتسطحية
subsurface safety valve	صمام آمان تحتسطحي
success ratio	نسبة النجاح
successful well	بئر ناجحة
succession	تتابع
sucker rod	ساق كباس الضخ
sucker rod pump	مضخة الصكرود
suction pump	مضخة ماصة
suction stroke	شوط المص (السحب)
suction tank	خزان المص
suite	مجموعة، طقم
sulphur content	محتوى الكبريت
supercontinent	القارة العملاقة
supercharging	شحن زائد
supply company	شركة موردة
support agreement	اتفاقية دعم
surface casing	قيسون سطحي
surface equipment	تجهيزات سطحية
surface subsidence	هبوط سطحي
surface treatment	معالجة سطحية
surfactant	خافض للتوتر السطحي
survey crew	طاقم المسح
swab	ممسحة، ماسحة
swamp gas	غاز المستنقعات
s-wave	الموجة الثانوية (القص)
sweep efficiency	فاعلية الاكتساح
sweet crude oil	زيت خام حلو
sweet natural gas	الغاز الطبيعي الحلو
sweetening	تحلية
swivel joint	وصلة متراوحة
syncline	طية مقعرة
synthetic seismogram	سيزموجرام اصطناعي

T

tadpole plot	المخطط السهمي
tank	صهريج
tar mat	طبقة قطرانية (قيرية)
tar sand	رمل قطراني
tariff	تعرفة، تعريفة (جمركية)
tax	ضريبة
TDT log	سجل زمن الانحلال الحراري
temperature	درجة الحرارة
tension-log platform	منصة الشد
terminology	اصطلاحات، مصطلحات فنية
tertiary recovery	الاستخلاص الثلاثي
testing	اختبار
texture	نسيج
thermal decay	انحلال حراري
thief zone	نطاق آسر
three-dimensional	ثلاثي الأبعاد
three-dimensional seismic (3-D)	المسح السيزمي ثلاثي الإبعاد
three-phase separator	فاصل ثلاثي الأطوار
throw	رمية
thrust fault	صدع الدسر
tie-in	ربط
tight formation	تكوين محكم (كتيم)
tight-hole	ثقب كتيم (محكم)

tightness	متانة
time	وقت، زمن
time lapse technique	أسلوب انقضاء الوقت
time-to-depth	التحويل من الوقت إلى العمق
timing	توقيت
tool	آلة، معدة، جهاز
tool pusher	مراقب الحفر
top drive	الدفع العلوي
topographic map	خريطة طبوغرافية
total depth	العمق النهائي
tour	نوبة عمل، رحلة، جولة
tracer	مقتف الأثر
track	مسار، مسلك، سكة
transition zone	نطاق انتقالي
translucent	نصف شفاف
transparent	شفاف
transportation	نقل
trapezoidal rule	قاعدة شبه المنحرف
traps	مصايد
traveling block	البكرة المتحركة
Triassic period	العصر الثلاثي
tricone drill bit	مثقب ثلاثي المخاريط
tripping in	شوط أو رحلة النزول إلى داخل البئر
tripping out	شوط أو رحلة الصعود إلى خارج البئر
truck-mounted rig	حفارة محمولة على عربة
true vertical depth	العمق الحقيقي الرأسي
tubing	أنبوب أو مواسير الإنتاج
tubing pressure	ضغط أنبوب الإنتاج
turbidity	كدورة، تعكر
turbine motor	محرك تربيني
turbo-drilling	حفر تربيني
two-dimensional seismic (2-D)	المسح السيزمي ثنائي الأبعاد
two-way travel time	زمن العبور ثنائي المسلك

U

U.S. gallon	جالون أمريكي
ultimate recovery	الاستخلاص الأقصى
ultraviolet light	ضوء فوقبنفسجي
umbilical cord	كبل سري
uncemented	غير مسمنت
uncertainty	غموض، ريبة
unconformity (angular)	لا توافق (زاوي)
unconsolided	غير متماسك
underbalance	اتزان ناقص
undersaturated	تحت مشبع
undeveloped	غير منمى
undiscounted	غير مخصم
uninvaded zone	نطاق بكر
unitization	توحيد
unloading	تفريغ
unproved reserves	احتياطيات غير مؤكدة
unstable	غير مستقر
upstream	ضد التيار، أعلى النهر
upthrown side	جانب صاعد
uranium	يورانيوم
utilities	مرافق

V

valve	صمام
vapour pressure	الضغط البخاري
variable thickness	سمك متغير
vent	منفس، فتحة تهوية، مخرج
vertical seismic profiling	البروفيل الرأسي السيزمي
vibration	إهتزاز
vibroseis	الاهتزاز
virgin pressure	الضغط البكر (الأصلي)

viscosity	لزوجة
volatile oil	زيت متطاير
volcanic rock	صخر بركاني
volumetric reserves	احتياطيات حجمية
vug	تجويف صخري، كهيف

W

waste disposal	تصريف النفايات
water based mud	طين على أساس مائي
water depth	عمق الماء
water encroachment	اجتياح الماء
water injection	الحقن بالماء
water sample	عينة ماء
water supply	إمداد الماء
water table	منسوب الماء
water- wet rock	صخر مبتل بالماء
water-cut	قطع الماء
water-flood	الإغراق بالماء، الفيضنة
wax	شمع
wearing	تثلم، بلي، تآكل
weathering	تجوية
wedge contact	تلامس إسفيني
weighting material	مادة للتثقيل
weirs	قناطر احتجاز
welded pipe	أنبوب ملحم
well head	رأس البئر
well abandonment	هجر البئر
well cleanout	تنظيف البئر
well completion	إكمال البئر
well conditioning	تهيئة البئر
well control	مراقبة البئر
well cuttings	فتات صخور البئر
well data	معطيات البئر
well intervention	تدخل الآبار
well killing	قتل البئر
well logging	تسجيلات الآبار
well shooting	رصد الآبار
well site	موقع البئر
well stimulation	تنشيط البئر
well testing	اختبار البئر
well workover	إصلاح البئر
wellsite geologist	جيولوجي البئر
wettability	القابلية للإبتلال
wetting agent	عامل تبليل (أو ترطيب)
whipstock	دعامة سوطية
wildcat well	بئر استكشافية
wing	جناح
wiper trip	رحلة للمسح
wireline logging	التسجيلات السلكية
withdrawal rate	معدل السحب
workover rig	حفارة إصلاح
worst-case scenario	الخيار الأسوأ
writeoff	تخريد

Y

Y-axis	محور الصادات
yielding rock	صخر مطاوع
yield	محصول، حصيلة، إنتاج

Z

Z (gas deviation factor)	معامل الانحراف للغاز
zeolite	زيوليت
zero deflection	انعدام الانحراف
zinc	زنك، خارصين
zircon	زركون
zonal flow	دفق نطاقي
zone	نطاق
zones	نُطُق

رقم الإيداع	٢٠١٣/٩٠٤١
I.S.B.N الترقيم الدولي	978-977-10-2875-8

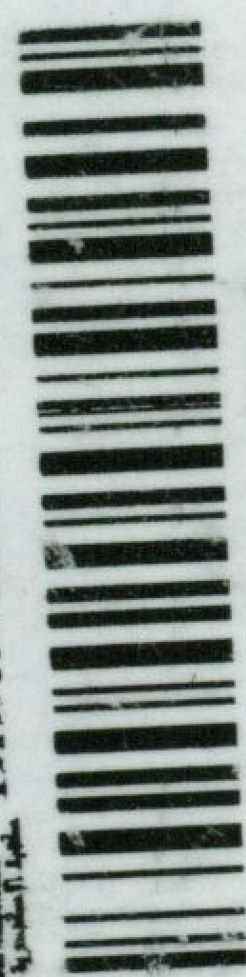


المؤلف

- أستاذ العلوم الجيولوجية والجيوفيزيائية بقسم التعدين والبترول فى كلية الهندسة جامعة الأزهر.
- حصل على درجة البكالوريوس فى العلوم الجيولوجية من جامعة عين شمس عام ١٩٥٨ ودرجة الدكتوراه فى تسجيلات الآبار وتقييم الخزانات البترولية من معهد جوبكن لهندسة البترول والغاز فى موسكو ١٩٦٤.
- قام بالتدريس لطلاب مرحلتى البكالوريوس والدراسات العليا وأشرف على رسائل الماجستير والدكتوراه فى الجامعات المصرية والأجنبية شملت جامعات عين شمس وأسيوط والقاهرة والمنوفية وقناة السويس، كما رأس وأسس قسم الهندسة الجيولوجية والجيوفيزيائية بكلية هندسة النفط والتعدين بجامعة طرابلس وقسم هندسة البترول وتكنولوجيا الغاز بالجامعة البريطانية فى مصر.
- بجانب العمل الأكاديمى له إسهاماته الكبيرة فى قطاع البترول فى مصر وخارجها حيث عمل خبيراً ومستشاراً لعدد من الشركات العاملة فى مجالات الاستكشاف والإنتاج شملت الشركة العامة للبترول وسوناطراك بالجزائر والمؤسسة الوطنية للنفط بليبيا وشركة شل العالمية والسويس للزيت وشركة بدر الدين للبترول ولوك أويل الروسية وجيسوم للزيت (بتروجلف) وميرلون الفيوم الأمريكية.
- له العديد من الأبحاث والدراسات والتقارير العلمية فى مجالات استكشاف وإنتاج البترول والغاز الطبيعى والمياه الجوفية باللغات الإنجليزية والروسية والعربية.
- عضو فى العديد من الجمعيات المهنية والعلمية الدولية والمحلية منها SPE و SPWLA و SEG و AAPG و AWRA و EPEX و EGS، وهو أيضاً عضو فى مجلس إدارة الجمعية الجيوفيزيقية المصرية، كما يرأس تحرير المجلة العلمية لهذه الجمعية منذ عام ٢٠٠٣ حتى الآن.

هذا الكتاب

هو محاولة جادة لتحقيق غاية سامية تستهدف مجد اللغة العربية القديم في التأليف العلمي، ويتناول الكتاب جانباً رئيساً في صناعة البترول والغاز الطبيعي والذي يعُرف بنشاط الاستشكاف والإنتاج ويتسم بنزعته الجسورة وطبيعته المليئة بالمخاطر العالية والتحديات الكبيرة
تسلسل زمني يسهل استيعابه ومسايرته بداية من الجوانب الجيولوجية إلى أعمال
والحفر والإنتاج وهندسة البترول وفي لغة علمية سلسة ومفيدة للدارسين
بصناعة البترول الحيوية؛ ولكى تكتمل الصورة فقد زود الكتاب بفهرس
والعلمية باللغتين العربية والإنجليزية بالإضافة إلى العديد من المراجع العلمية
ونحسب أن يكون هذا الكتاب هو الأول من نوعه فى المكتبة العربية بالنسبة لهذا



I.S.B.N. 978-977-10-2875-8
تطلب جميع منشوراتنا من وكيلنا الوحيد بالكويت والجزائر
دار الكتاب الحديث